



**Ministère de l'enseignement supérieur
et de la recherche scientifique**

Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Faculté de technologie

Département de GENIE CIVIL

MEMOIRE Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER

FILIERE : Génie Civil SPECIALITE : Géotechnique

Par :

KHENOUF Mohammed

THEME

***CORRELATION DES DONNEES SIG ET GEOSTATISTIQUE POUR
L'ETABLISSEMENT D'UN MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN
(Application à l'établissement du MNT de la commune de Hammam Dalaa -wilaya de Msila)***

Soutenu devant le jury composé de Messieurs :

BELAGRAA Larbi, Professeur, Université Med Boudiaf - M'sila, Président

HAMITOUCHE Amar, M.A.A, Université Med Boudiaf - M'sila, Examineur

SEDDIKI Ahmed, M.C.A, Université Med Boudiaf - M'sila, Co-Encadreur

KHEMISSA Mohamed, Professeur, Université Med Boudiaf - M'sila, Encadreur

Promotion : 2021/2022

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier, mon directeur de mémoire **M. KHEMISSA Mohamed**, professeur à l'université Mohamed Boudiaf de Msila, pour ses conseils avisés, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

Je tiens à témoigner toute ma reconnaissance aux personnes suivantes, pour leur aide dans la réalisation de ce mémoire :

- Mon co-encadrant, M. SEDDIKI Ahmed, maitre de conférence à l'université de Msila, qui m'a beaucoup appris sur les défis auxquels sont confrontés le domaine des SIG et de la géostatistique. Il a partagé ses connaissances et son expérience dans le domaine tout en me donnant confiance et une grande indépendance dans la réalisation de tâches valorisantes.
- Toute l'équipe pédagogique de l'Université de Msila, responsable de ma formation, en a assuré la partie théorique.
- Mes amis et collègues qui m'ont apporté leur soutien moral et intellectuel tout au long de ma démarche.
- Ma très chère maman, merci pour son soutien continu et ses encouragements.

À tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.

Mohammed Khenouf

Résumé

Le concept de modèle numérique de terrain est l'une des applications les plus riches des systèmes d'information géographique (**SIG**). En corrélant des points denses et régulièrement répartis, sur une carte avec leurs **altitudes**, ils ouvrent la porte à de nombreuses applications intéressantes simultanément les géographes, les agronomes, les concepteurs d'ouvrages d'art ou les planificateurs.

Après une brève introduction aux domaines d'application, nous présentons les méthodes existantes pour construire des modèles numériques de terrain et comment ces **MNT** modifient les systèmes d'information géographique.

Nous ne détaillerons pas l'application des modèles numériques de terrain en cartographie ou en géographie et géologie, ils sont naturellement l'une des principales voies de recherche, et le relief est l'une des composantes fondamentales de ces sciences. Pour ce faire, un relevé **GPS** du maillage régulier de la commune de Hammam Dalaa en XYZ, une évaluation **géostatistique** numérique par **krigeage**, a été utilisé pour construire des cartes de **prédiction spatiale** MNT couvrant toute la commune, sous différents formats et la détermination de la variance d'erreur.

Mots clés : SIG - altitudes - MNT- GPS - Géostatistique - krigeage - prédiction spatiale

Abstract

The concept of digital terrain model is one of the richest applications of geographic information systems (**GIS**). By correlating dense and regularly distributed points on a map with their **altitudes**, they open the door to many applications of simultaneous interest to geographers, agronomists, designers of engineering structures or planners.

After a brief introduction to the fields of application, we present the existing methods to build digital terrain models and how these **DEM** modify geographic information systems.

We will not detail the application of digital terrain models in cartography or in geography and geology, they are naturally one of the main avenues of research, and relief is one of the fundamental components of these sciences. To do this, a **GPS** survey of the regular mesh of the municipality of Hammam Dalaa in XYZ, a digital geostatistical evaluation by **kriging**, was used to build **spatial prediction** maps DEM covering the entire municipality, in different formats and the determination of the error variance.

Keywords: GIS - altitudes - DEM- GPS - Geostatistics - kriging - spatial prediction

ملخص

يعد مفهوم نموذج التضاريس الرقمية أحد أغنى تطبيقات نظم المعلومات الجغرافية. من خلال ربط النقاط الكثيفة والموزعة بانتظام على الخريطة بارتفاعاتها، فإنها تفتح الباب أمام العديد من التطبيقات ذات الاهتمام المتزامن للجغرافيين والمهندسين الزراعيين ومصممي الهياكل الهندسية أو المخططين. بعد مقدمة موجزة لمجالات التطبيق، نقدم الأساليب الحالية لبناء نماذج التضاريس الرقمية وكيف تقوم هذه النماذج بتعديل أنظمة المعلومات الجغرافية.

لن نقوم بالتفصيل بتطبيق نماذج التضاريس الرقمية في رسم الخرائط أو في الجغرافيا والجيولوجيا، فهي بطبيعتها الحال أحد السبل الرئيسية للبحث، والتضاريس هي أحد المكونات الأساسية لهذه العلوم. للقيام بذلك، تم مسح بلدية حمام الضلعة بنظام الموقع الجغرافي على شكل شبكة منتظمة (س، ع، ص)، استعملنا طريقة تقييم جيواحصائي رقمي بواسطة كريجينغ، لبناء خريطة التنبؤ المكاني لـ نموذج التضاريس الرقمي يغطي البلدية بتنسيقات مختلفة وتحديد تباين الخطأ.

الكلمات الدالة: نظم المعلومات الجغرافية – الارتفاعات - نموذج التضاريس الرقمي – جيواحصائي - كريجينغ - التنبؤ المكاني.

SOMMAIRE

Remerciements

Résumé/Abstract/ملخص

Liste des figures

Introduction Générale 1

Première Partie

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre Premier 5

Généralités sur les systèmes d'information géographique SIG 5

I.1. Introduction 5

I.2. Définitions de Système d'Information Géographique (SIG) 6

I.3. L'information géographique IG 7

I.4. Les principales composantes d'un SIG 8

I.5. Les fonctionnalités d'un SIG (les 5 A) 8

I.6. Domaines d'application des SIG 9

I.7. Le SIG idéal 10

I.8. Les données dans les SIG 10

I.9. Mode d'acquisition des données géographiques 13

I.10. Avantages des SIG 14

I.11. Inconvénients des SIG 15

Chapitre Deuxième 17

Méthodes d'Interpolation et de Prédiction Spatiale 17

II.1. Méthodes d'interpolation 17

II.2. Méthodes probabilistes 19

II.3. Krigeage 19

II.4. Le Variogramme 20

II.5. Conclusion	24
Le Modèle Numérique de terrain	25
Chapitre Troisième.....	26
Le Modèle Numérique de terrain	26
III.1. Introduction.....	26
III.2. La Grille du Modèle Numérique de Terrain (MNT)	26
III.3. Différents types de maillage	27
III.4. MNT ou MNE ou MNS.....	27
III.5. Acquisition des données altimétriques	28
III.6. Création du modèle numérique de terrain MNT.....	29
Chapitre Quatrième	32
Outils Numérique Utilisé.....	32
IV.1. Aperçu sur ArcMap d’ArcGIS Desktop.....	32
IV.2. L’analyse exploratoire de données quantitatives	33
IV.3. Les méthodes d’interpolation spatiale implémentées dans ArcGIS	37

Deuxième Partie

SIMULATION NUMERIQUE

Chapitre cinquième	44
Application à l’établissement du MNT de la commune de Hammam Dalaa	44
V.1. Présentation de la zone d’étude.....	44
V.2. Recueillement des données.....	46
V.3. Analyse exploratoire de la série des altitudes des points mesurés :.....	47
V.4. La prédiction Spatiale des altitudes.....	49
V.5. Validation et discussions des résultats des méthodes d’Interpolation par krigeage ..	58
V.6. Synthèse.....	61
Conclusions Générales	62
Références Bibliographique.....	64

Liste des Figures

Figure I.1. Fonctionnalités d'un SIG.....	5
Figure I.2. Superposition des couches constituant un SIG	6
Figure I.3. L'information géographique rattachée à l'espace	7
Figure I.4. Principales composantes d'un SIG.....	8
Figure I.5. Abstraction	8
Figure I.6. Les 5 fonctionnalités d'un SIG	9
Figure I.7. Stockage sur plusieurs sites	10
Figure I.8. : Types de données dans un SIG	11
Figure I.9. Représentation des Données en mode Vecteur (aspect sémantique)	11
Figure I.10. Mode de représentation Vecteur/Raster/Réel.....	12
Figure I.11. Exemple d'importation de fichiers vers le SIG	14
Figure I.12. Carte géographique dans le SIG.....	14
Figure II.1. Récapitulation des méthodes d'interpolation déterministes	17
Figure II.2 Les méthodes d'interpolation probabiliste	19
Figure II.3. Schéma type d'un variogramme	21
Figure II.4. Schéma de calcul du variogramme expérimental.....	22
Figure II.5. Ajustement d'un modèle théorique (courbe) à un modèle expérimental (croix).....	22
Figure II.6. Graphe d'un variogramme expérimental et son modèle d'ajustement.....	23
Figure II.7. Modèle type de semivariogramme exponentiel	23
Figure II.8. Modèle type de semivariogramme gaussien.....	24
Figure II.9. Modelé type de semivariogramme sphérique	24
Figure III.1. Grille d'un modèle de terrain	26
Figure III.2. Propriétés du Maillage.....	27
Figure III.3. Différents types de modèles numériques de terrain	28
Figure III.4. Recueillement des données altimétrique a/ Numérisation (vectorisation) b/ Stéréoscopie	29
Figure IV.1. Interface graphique d'ArcMap version 10.8	32
Figure IV.2. Fenêtre exploration des données dans ArcMap.....	33
Figure IV.3. Exemple de boîte de dialogue Histogramme.....	34
Figure IV.4. Carte graphique quantile-quantile (QQ)	35
Figure IV.5. Fenêtre outils d'analyse des tendances.....	35
Figure IV.6. Exemple de carte de Voronoi.....	36
Figure IV.7. Exemple de krigeage ordinaire à une dimension spatiale	40
Figure IV.8. Exemple de krigeage universel	41
Figure V.1. Localisation de la zone d'étude commune de Hammam Dalaâ	44
Figure V.2. Localisation géographique du canton El Haourane	45
Figure V.3. Histogramme la série statistique Altitudes	47
Figure V.4. QQ plot de la série statistique Altitudes.....	48
Figure V.5. Statistique de la série d'altitudes	48
Figure V.6. Carte MNT en dégradé par la méthode de Krigeage Simple.....	50

Figure V.7. Carte MNT en deux bandes par la méthode de Krigeage Simple	51
Figure V.8. Ajustement par un variogramme de modèle sphérique	52
Figure V.9. Caractéristiques de l'erreur d'interpolation par krigeage Ordinaire.....	52
Figure V.10. Détails sur les données en entrée, la méthode d'interpolation, le type et les paramètres du modèle de semi variogramme.....	53
Figure V.11. Carte MNT en dégradé par la méthode de Krigeage ordinaire	54
Figure V.12. Carte de variance d'erreur de prédiction obtenue par krigeage Ordinaire.....	55
Figure V.13. Carte MNT en dégradé par la méthode de Krigeage Universel	56
Figure V.14. Carte MNT en deux bandes niveau de gris par la méthode de Krigeage Universel	57
Figure V.15. Carte des courbes de niveau obtenue par la méthode d'interpolation Géostatistique.....	57
Figure V.16. Carnet de terrain type Ranger.....	58
Figure V.17. Validation sur la base d'un levé GPS manuel	59
Figure V.18. Surface 3D obtenue par interpolation par krigeage à l'aide du logiciel Surfer	60
Figure V.19. Image Google comparable à la surface 3D obtenue par interpolation.....	60

Introduction Générale

Il existe de nombreuses méthodes d'interpolation dans la littérature, qui sont généralement classées en deux catégories : les méthodes locales et les méthodes globales.

Les méthodes locales prédisent la valeur d'un point en fonction des valeurs des points de son voisinage. La méthode d'interpolation globale utilise tous les points d'échantillonnage disponibles pour générer des prédictions pour un point spécifique.

Ces méthodes aident à évaluer et à éliminer les phénomènes globaux (tels que les tendances) dans les données physiques.

Toutes ces méthodes sont également appelées méthodes déterministes, par opposition aux méthodes géostatistiques.

Le krigeage est une méthode d'interpolation géostatistique qui utilise un variogramme (analyse de la variabilité des données en fonction de la distance qui les sépare). Le variogramme dépend de la distribution spatiale des données, pas de la valeur réelle. Lorsque on applique le krigeage, nous pouvons voir les résultats pour les points d'entrée qui diffèrent des valeurs d'entrée.

La génération d'un MNT nécessite l'acquisition de données spatiales soit sous forme de données altimétriques, soit sous forme de données photogrammétrique. Les moyens d'acquisition de ces données ont beaucoup évolué de nos jours et permettent d'acquérir des données de haute densité (plusieurs points par m²) sur des zones de plusieurs hectares.

Dès lors, il est d'une grande importance que nous nous intéressions de près à ces nouvelles technologies, ainsi qu'à l'analyse des erreurs des MNT qui en sont issues afin de les quantifier d'une part et d'autre part, d'identifier les méthodes permettant de les propager à travers une application.

Le travail de ce mémoire vise à combiner Système d'Information Géographique et méthodes géostatistiques pour réaliser des cartes thématiques, à savoir des modèles numériques de terrain.

Dans un premier temps, nous introduisons des généralités sur les système d'information géographique SIG. Nous exposons ensuite les différentes approches d'interpolation et de prédiction spatiale.

Nous avons présenté le module ArcMap du logiciel ArcGIS, son mode de fonctionnement, l'introduction des données, la gestion des données et la lecture des résultats.

Une introduction aux méthodes géostatistiques mises en œuvre dans ArcMap, en commençant par l'analyse exploratoire, la structuration et le réglage des semi-variogramme, et l'interpolation par différentes techniques de krigeage.

Enfin, un levé GPS du quadrillage régulier de la commune de Hammam Dalaa en XYZ, une évaluation géostatistique numérique, a été utilisé pour construire une carte prévisionnelle du MNT couvrant la commune sous différentes format et la détermination de la variance d'erreur.

Première partie

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre Premier

***GENERALITES SUR LES SYSTEMES
D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE SIG***

GENERALITES SUR LES SYSTEMES D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE SIG

I.1. Introduction

Un système d'information géographique (SIG) est un système informatique permettant à partir de diverses sources, de rassembler et organiser, de gérer, d'analyser et recombinaison, d'élaborer et de présenter des informations localisées géographiquement contribuant notamment à la gestion de l'espace.

Un système d'information géographique est aussi un système de gestion de base de données pour la saisie, le stockage, l'extraction, l'interrogation, l'analyse et l'affichage de données localisées.

C'est un ensemble de données repérées dans l'espace, structuré de façon à pouvoir en extraire commodément des synthèses utiles à la décision.

Un système d'information géographique est un ensemble d'équipements informatiques, de logiciels et de méthodologies pour la saisie, la validation, le stockage et l'exploitation de données, dont la majorité est spatialement référencée, destinée à la simulation de comportement d'un phénomène naturel, à la gestion et l'aide à la décision.

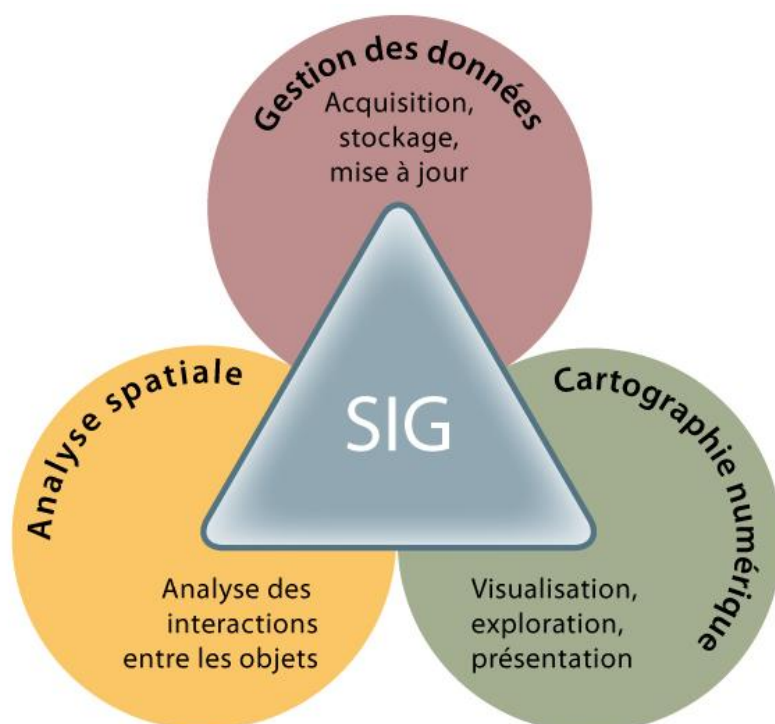


Figure I.1. Fonctionnalités d'un SIG

I.2. Définitions de Système d'Information Géographique (SIG)

Il existe plusieurs définitions de Système d'Information Géographique (SIG), mais nous focalisant uniquement sur les définitions les plus importantes :

1. La définition de l'économiste Didier (1990) "Un SIG est un ensemble de données repérées dans l'espace, structuré de façon à pouvoir en extraire commodément des synthèses utiles à la décision".
2. Selon le Comité Fédéral de Coordination Inter-agences pour la Cartographie Numérique aux États-Unis (1988) "Un SIG est un système informatique de matériels, de logiciels et de processus conçu pour permettre : la collection, la gestion, la manipulation, l'analyse, la modélisation, l'affichage des données à référence spatiale, afin de résoudre des problèmes complexes d'aménagement et de gestion".
3. Selon la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection : "Un SIG est un système informatique qui permet à partir de diverses sources, de rassembler, d'organiser, de gérer, d'analyser, de combiner, d'élaborer et de présenter des informations localisées géographiquement, contribuant notamment à la gestion de l'espace".

Le SIG est une représentation du monde réel. Pour passer du monde réel à sa représentation, on organise les données selon leur thème comme il est représenté dans la Figure I.2 :

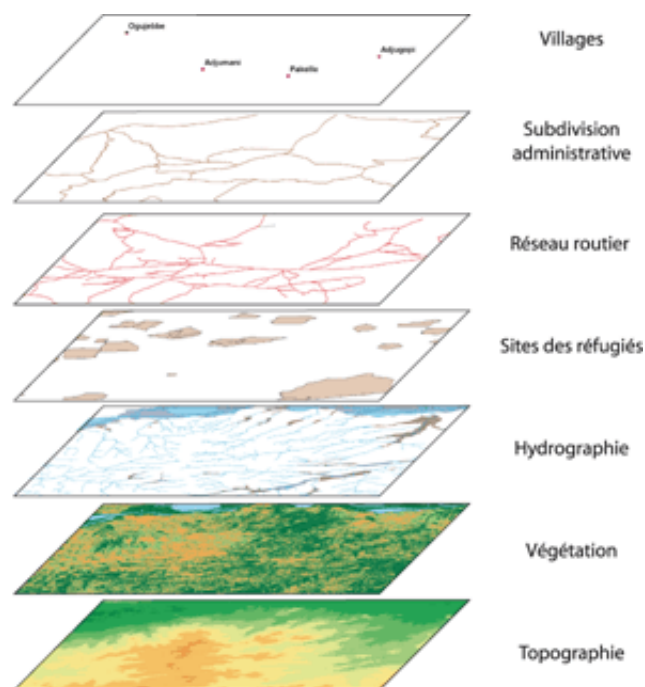


Figure I.2. Superposition des couches constituant un SIG

I.3. L'information géographique IG

L'Information géographique est une donnée ayant une référence spatiale soit sous forme de :

1. Coordonnées géographiques
2. Nom de lieu
3. L'adresse postale ou autre.

Elle peut être dupliquée sans détérioration, s'échange à haute vitesse au travers des réseaux de web, se cumule avec différentes informations en vue d'en produire de nouvelle.

L'Information géographique est obtenue, déposée, analysée, affichée et partagée à l'aide de système d'information géographique (SIG). C'est une information liée à un objet ou à un phénomène, décrit plus ou moins complètement (Figure I.3) :

1. Par ses caractéristiques diverses (c.-à-d. sa nature et son aspect).
2. Par son emplacement sur la terre. Le premier groupe de données est appelé aussi attributs, alors que le second groupe est appelé données géométriques. Par exemple l'IG sur une route se définit par son nombre de voies, son revêtement, son nom, sa grandeur et son positionnement sur la surface terrestre. Il faut signaler que l'IG est de plus en plus présente dans notre vie sous une forme numérique.

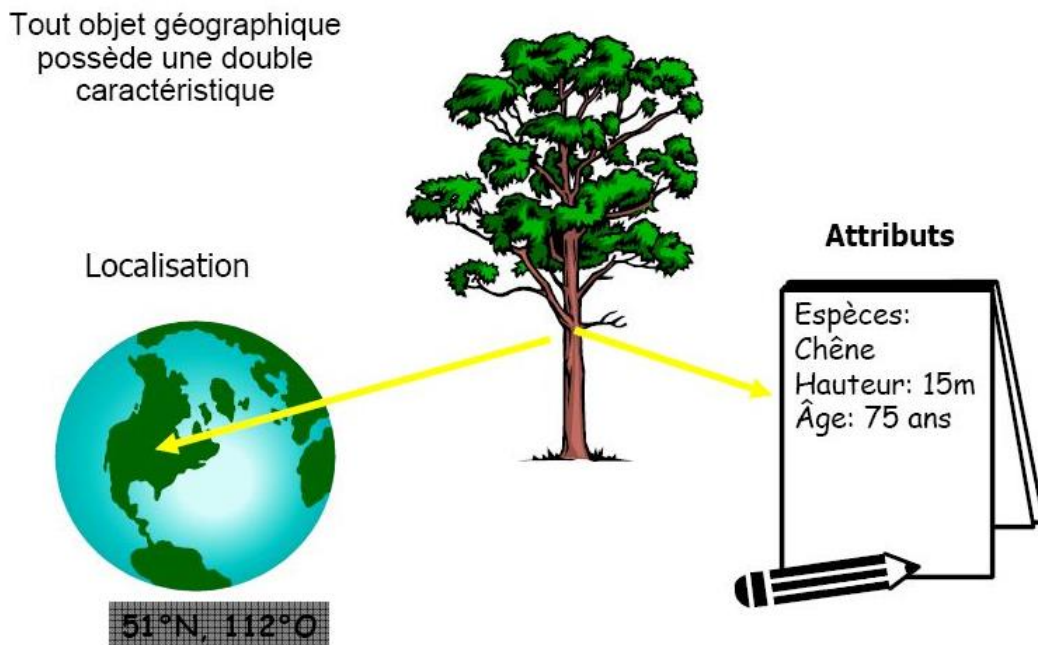


Figure I.3. L'information géographique rattachée à l'espace

I.4. Les principales composantes d'un SIG

Selon ESRI France (ESRI, 2018) un Système d'Information Géographique (Figure I.4) est composé de et :

- Matériel informatique (hardware) : ordinateur (pc)
- Logiciels (software)
- Données (Information Géographique : L'information géographique peut, soit être constituée en interne, soit acquise auprès de producteurs de données.
- Personnel formé

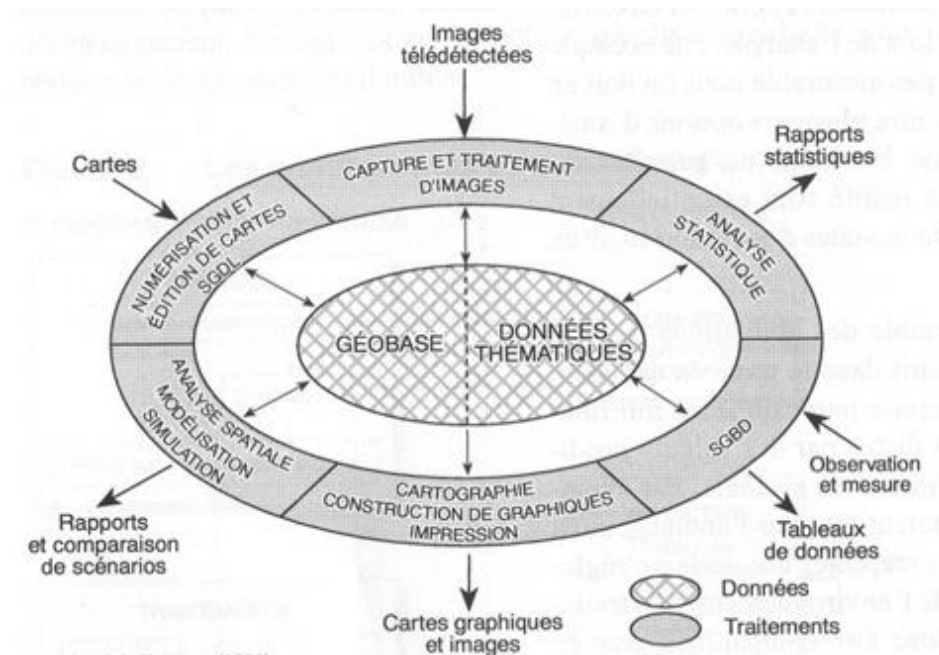


Figure I.4. Principales composantes d'un SIG

I.5. Les fonctionnalités d'un SIG (les 5 A)

Les SIG sont créés pour répondre à différentes demandes et comme le système commun n'existe pas, il faut les ajuster selon les objectifs établis. Néanmoins il faut dire qu'il y'a 5 fonctionnalités « on les appelle les 5A » que tous les SIG doivent assurer (figure I.6)

Abstraire : Concevoir un modèle qui arrange les données par constituants géométriques et par attributs descriptifs, et qui permet aussi d'établir des relations entre les objets (Figure I.5).



Figure I.5. Abstraction

Acquérir : Le logiciel doit posséder des fonctionnalités de digitalisation et d'importation de données ;

Archiver : Le logiciel doit avoir une grande capacité de stockage des données. Stockage des données géométriques et attributaires.



Figure I.6. Les 5 fonctionnalités d'un SIG

Analyser : Capacité d'analyser les données géographiques (méthodes quantitatives et statistiques, opérateurs topologiques, etc.).

Afficher : Capacité d'affichage de l'information géographique sous forme de Cartes, tables, etc.

I.6. Domaines d'application des SIG

Les SIG peuvent être utilisés pour étudier plusieurs phénomènes (figure I.7), entre autres on peut citer :

• Pour les grandes échelles :

- La gestion foncière et cadastrale : ex. recensement des propriétés privées et le calcul de leurs surfaces.
- La planification urbaine : ex. réalisation des cartes d'occupation des sols et plans d'aménagement urbain.
- La gestion des réseaux : ex. réseau d'assainissement, approvisionnement en eau potable, gaz, électricité, téléphone, etc.
- La gestion des espaces verts naturels ou urbains : ex. parcs naturels et jardins publics.

• Pour les échelles moyennes et petites :

- L'identification des meilleurs endroits pour l'emplacement d'une nouvelle ressource ou ce que n'appelle carte d'aptitude.
- Les études d'ingénierie routière : ex. constructions de routes ou d'autoroutes.
- Les applications liées à la prévention des risques naturels.

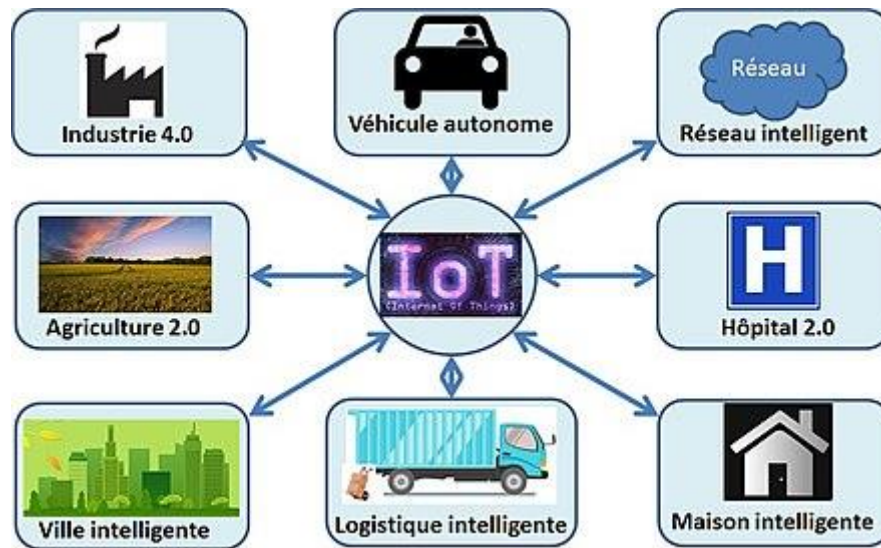


Figure I.7. Stockage sur plusieurs sites

I.7. Le SIG idéal

Le SIG idéal possède certaines qualités qu'on cite ci-dessous :

Rentable : en fonction de l'autorisation de l'organisation.

Pertinent : notamment pour les résultats.

Flexible : il faut qu'il soit capable d'évoluer.

Sécuritaire : il protège l'information confidentielle.

Compétitif : vérification de la qualité et le rendement des traitements.

Autonome : notamment le logiciel, afin d'assurer l'évolution de la portabilité.

Coopératif : les tâches et les fonctions des différents services et individus impliqués, il faut qu'elles soient bien définies.

Motivant : la conception et l'utilisation doivent être gérées par l'utilisateur.

Documenter : la documentation doit être écrite conjointement au développement du logiciel.

I.8. Les données dans les SIG

I.8.1. Types de données dans les SIG

Toutes les géométries spatiales peuvent être décrites par 4 types de propriétés comme il est représenté dans la figure I.8 :

- Leur position à la surface de la terre.
- Les relations spatiales (topologie).
- Leurs attributs.
- Leurs métadonnées.

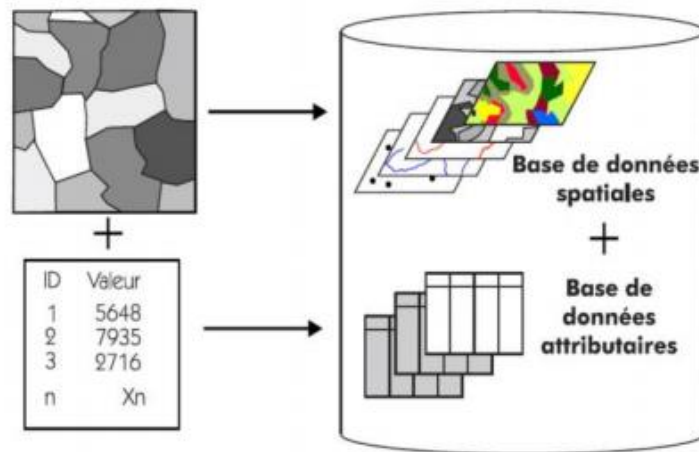


Figure I.8. : Types de données dans un SIG

I.8.2. Données spatiales

Dans les SIG, il y a 2 modes de projection des données géographiques :

Mode vecteur

Ce mode répond au souci de représenter un objet de manière aussi exacte que possible. Pour transformer un objet réel en une donnée à référence spatiale, on décompose le territoire en couches thématiques (relief, routes, bâtiments...) structurées dans des bases de données numériques. (Figure I.9).

Les avantages du mode vecteur sont

- Une meilleure adaptation à la description des entités ponctuelles et linéaires.
- Une facilité d'extraction de détails.
- Une simplicité dans la transformation de coordonnées.

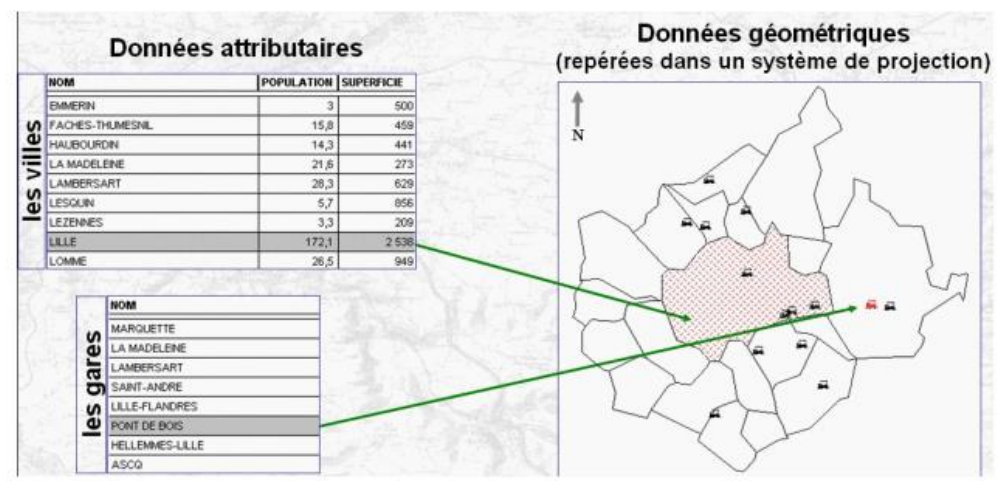


Figure I.9. Représentation des Données en mode Vecteur (aspect sémantique)

Les inconvénients du mode vecteur sont

- Les croisements de couches d'information sont délicats et nécessitent une topologie parfaite.

Mode raster

Le mode trame ou raster est également appelé modèle matriciel. Contrairement au mode vecteur qui ne décrit que les contours, le mode raster décrit la totalité de la surface cartographique point par point. Il est utilisé principalement dans les systèmes (Figure I.10) :

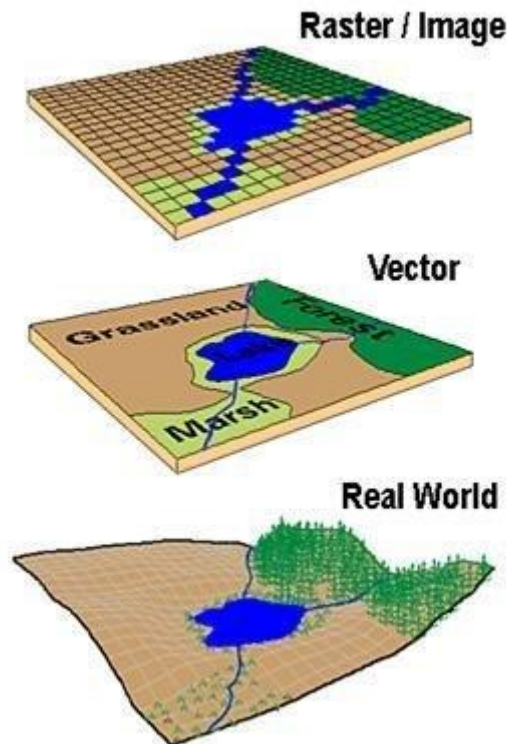


Figure I.10. Mode de représentation Vecteur/Raster/Réel

Les avantages du mode raster sont

- Meilleure adaptation à la représentation des détails surfaciques.
- Acquisition des données à partir d'un scanner à balayage.
- Meilleure adaptation à certains types de traitements numériques : filtres, classifications.

Les inconvénients du mode raster sont :

- Mauvaise adaptation à la représentation des détails linéaires.
- Obligation de parcourir toute la surface pour extraire un détail.
- Impossibilité de réaliser certaines opérations topologiques, la recherche du plus court chemin dans un réseau par exemple.

I.8.3. Données associées

Les données associées des objets spatiaux complètent la représentation géométrique de l'entité spatiale. En fait, chaque élément de l'espace (c.à.d. point, ligne, ou polygone) reçoit un code d'identification (ID) qui peut être numérique ou littéral.

Ce dernier compose en une étiquette déterminant l'entité spatiale. Parmi les données associées on distingue :

a) Données de classification

Permettent de classer le point, la ligne, ou le polygone dans une classe déterminée tel que le type de parcelle (irrigué, non irrigué), type de route (primaire, secondaire), etc.

b) Données d'identification

Donnent la possibilité de distinguer chaque objet figurant sur la carte, par exemple nom de la commune, numéro de parcelle, numéro de vanne, etc.

c) Données attributaires

Porter une information complémentaire propre à chaque objet identifié, tel que le possesseur de la parcelle, la superficie de la parcelle, etc.

I.9. Mode d'acquisition des données géographiques

L'obtention des données spatiales consiste au rassemblement de différentes sources permettant la saisie des données dans le but de leurs intégrations dans un SIG. Nous exposons dans ce qui suit les différentes méthodes d'acquisition de données spatiales.

I.9.1. Import de fichiers

Il y a généralement trois manières pour importer les données spatiales (Figure I.11.).

Importer une base de données arrangée dans un format interne à un SIG. Cette méthode est valable entre les SIG d'un même type mais elle est compliquée entre des SIG de types ou de versions distinctes.

Importer un fichier texte (Txt) contenant tous les renseignements structurés de manière primitive. Il faut noter que cette méthode nécessite un arrangement des données importés pour qu'elles concordent avec la structure interne du SIG.

Passer par une des normes d'échange disponible sur le marché. Ce troisième moyen est le plus économique à long terme

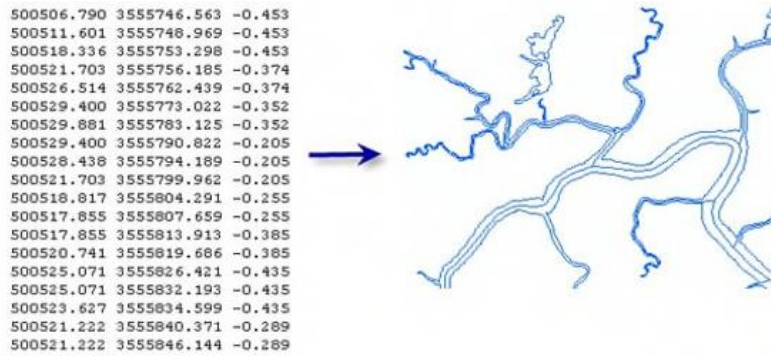


Figure I.11. Exemple d'importation de fichiers vers le SIG

I.9.2. La carte géographique dans le SIG

Qui décrit la forme et les caractéristiques de l'entité tout en la localisant par des coordonnées géographiques ou cartographiques. Une composante attributaire : la légende, qui identifie les entités représentées (figure I.12).



Figure I.12. Carte géographique dans le SIG

I.10. Avantages des SIG

- Capacité et fiabilité de stockage
- Rapidité de restitution des données (gain de temps)
- Intégration et combinaison de données de sources différentes
- Précision des processus cartographiques
- Facilité de mise à jour (Outils de suivi)
- Analyse des relations spatiales (Intégration, requête spatiale, Combinaison et superposition de cartes).
- Production de cartes (bon rapport qualité / prix).

I.11. Inconvénients des SIG

Les principaux inconvénients sont énumérés ci-dessous :

- Le manque de personnel spécialisé et compétant ;
- Coût élevé et problèmes techniques pour l'acquisition des données fiables ;
- Non Standardisation des formats de données ;
- Nécessité d'une mobilisation continue des acteurs.

Chapitre Deuxième

***METHODES D'INTERPOLATION ET DE
PREDICTION SPATIALE***

METHODES D'INTERPOLATION ET DE PREDICTION SPATIALE

II.1. Méthodes d'interpolation

On distingue deux grandes classes : les méthodes déterministes et les méthodes probabilistes. Ces dernières se différencient par le concept du hasard et proposent des modèles probabilistes modélisant les erreurs aléatoires de prévision dans le but d'aider la prise des décisions lors des analyses des risques.

II.1.1. Méthodes déterministes

L'idée de base des méthodes déterministes est fondée sur l'observation suivante : les valeurs les plus proches les unes des autres doivent se ressembler plus et par conséquent reçoivent un poids important lors de la modélisation (Figure II.1) présente un résumé des principales méthodes déterministes.

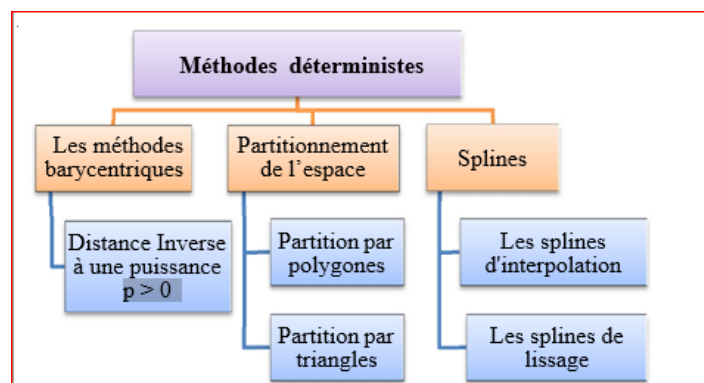


Figure II.1. Récapitulation des méthodes d'interpolation déterministes

A-Méthodes barycentriques

Les méthodes barycentriques, dans d'autres versions on cite les moyennes mobiles ou encore l'approximation de Kernel, sont très intuitives ; elles estiment la valeur inconnue \hat{z} située S_0 par une simple moyenne pondérée des autres valeurs connues : $\hat{z}(s_i): \hat{z}(s_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(s_i)$

Avec n est le nombre de données primaires, λ_i sont les poids qui dépendent de la distance euclidienne $h = \|s_i - s_0\|$ entre la position de la valeur observée $Z(s_i)$ et la valeur estimée (s_i). Plus on s'éloigne de la valeur à estimer, plus le poids λ_i diminue. Un cas particulier se présente pour calculer les λ_i la méthode de l'inverse de distance à une puissance $p > 0$. On peut exprimer $\hat{z}(s_0)$ comme une combinaison linéaire de plusieurs observations environnantes avec des poids inversement proportionnels au carré de la distance.

$$\hat{z}(s_0) = \sum_{i=1}^{de s_0} \frac{\frac{1}{\|s_i - s_0\|^p}}{\sum_{i=1}^{nevoisinage de s_0} \frac{1}{\|s_i - s_0\|^p}}$$

B- Méthodes d'interpolation par partitionnement de l'espace

Ces méthodes diffèrent des autres méthodes déterministes par l'utilisation d'une partition Duchamp d'études D lors de la détermination des poids λ_i ainsi que le nombre nécessaire de mesures voisines du point estimé. Comme son nom l'indique, on doit positionner tout d'abord les points cibles (les mesures expérimentales) dans l'espace, puis réaliser l'interpolation spatiale. Pour le positionnement des points, il existe deux types de partitions d'échantillon en régions juxtaposées : une partition par polygones ou par triangles.

Dans le premier cas, on définit un polygone pour chaque observation (mesure expérimentale) de façon que chaque point inclus, soit le plus proche du point de mesure que pour les autres polygones à côté. Une de ces méthodes est le partitionnement par polygone de Thiessen. Elle permet d'évaluer des moyennes spatiales sur un domaine à partir d'informations ponctuelles. La valeur de l'observation la plus proche est affectée au polygone défini par le vecteur s_0 :

$$\hat{z}(s_0) = z(s_\alpha) \text{ avec } |s_0 - s_\beta| < |s_0 - s_\alpha| \text{ Quel que soit } \alpha \neq \beta$$

En revanche, pour le deuxième cas, on aura une partition par triangulation où on découpe l'échantillon sous forme de triangles dont les sommets sont des points de mesure. Il suffit donc de relier le point de la mesure à estimer par les trois sommets du triangle qui le contient. Ensuite, le triangle principal est divisé en trois petits triangles. Comme on considère uniquement les valeurs mesurées qui interceptent le triangle de la valeur à estimer, le poids λ_i de chaque valeur mesurée est proportionnel à la surface d'intersection.

C-Splines

Les Splines sont des fonctions qui minimisent l'énergie de flexion sous certaines contraintes d'ajustement. On distingue essentiellement deux types de Splines :

- les Splines d'interpolations qui obligent la courbe de passer par tous les points de mesures
- et les Splines de lissages qui passent à proximité de toutes les mesures sans être forcées de passer par tous ces points.

Les travaux de Hastie ont abouti à des fonctions qui permettent la représentation d'une Spline dans l'espace bidimensionnel tout en contrôlant le passage proximité des points de mesure de façon à minimiser la courbure. On note aussi l'existence de plusieurs variantes comme les splines multi-quadratiques de Hardy et les splines régularisées avec tension. Finalement, on mentionne les

splines Laplaciennes étudiées également par Hastie et qui utilisent des sous-modèles linéaires pour effectuer une interpolation spatiale multivariable.

II.2. Méthodes probabilistes

L'utilisation des modèles probabilistes, pour décrire le comportement d'une variable aléatoire permet d'évaluer l'incertitude de la valeur estimée. Parmi les méthodes recensées en littérature, on cite la régression, le krigeage et les simulations stochastiques, comme la montre (Figure II.2).

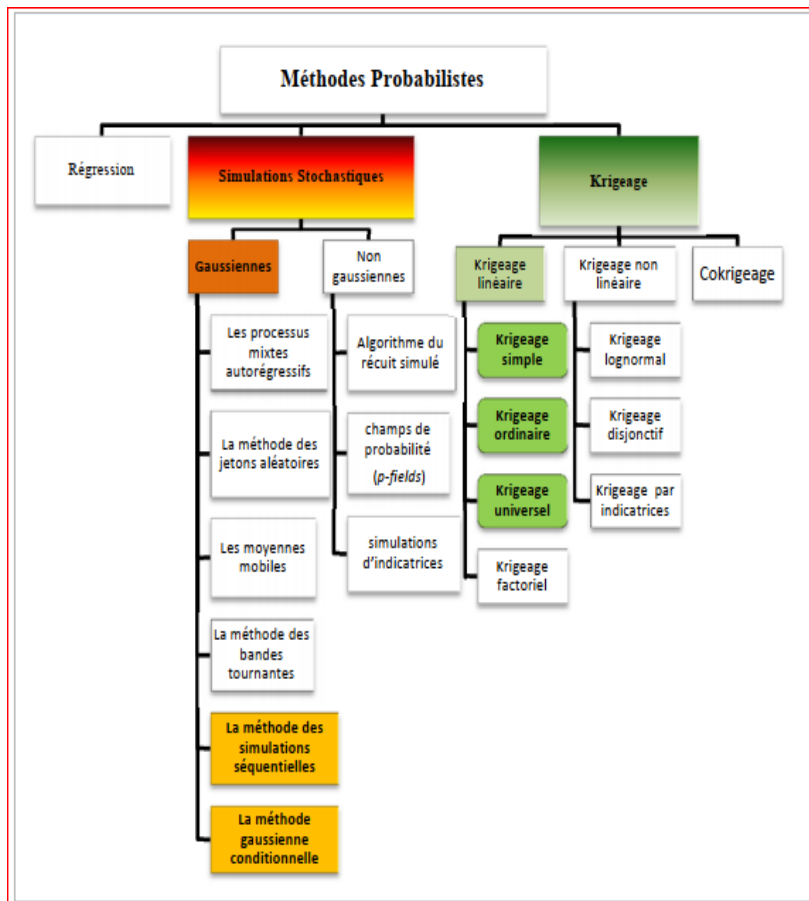


Figure II.2 Les méthodes d'interpolation probabiliste

II.3. Krigeage

Le krigeage est une méthode d'interpolation spatiale qui prend en compte la structure de dépendance spatiale des données. Le krigeage se caractérise par une interpolation tout en conservant une variance minimale. Les poids des coefficients de krigeage dépendent de la localisation des observations et surtout des structures de dépendance spatiale. La structure de la dépendance de la fonction aléatoire est déterminée à partir de l'étude Variographique travers le modèle du semi variogramme Plusieurs types de krigeage ont été étudiés en littérature :

- Simple (KS)

- Ordinaire (KO)
- Universel

II.3.1. Krigeage ordinaire (KO)

On a vu que le krigeage simple requiert la connaissance de la moyenne pour déterminer les poids de l'estimateur et pour estimer sa variance.

La résolution d'un système de krigeage ordinaire est un problème d'optimisation. On doit trouver les poids en minimisant l'erreur quadratique moyenne.

II.3.2. Propriétés du krigeage

Les principales propriétés et caractéristiques associées au krigeage sont :

- ✓ Linéaire, sans biais, à variance minimale, par construction.
- ✓ Interpolateur exact : si l'on estime un point connu, on retrouve la valeur connue.
- ✓ Présente un effet d'écran : les points les plus près reçoivent les poids les plus importants. Cet effet d'écran varie selon la configuration et selon le modèle de variogramme utilisé pour le krigeage. Plus, l'effet de pépite est important, moins il y a d'effet d'écran.
- ✓ Tient compte de la taille du champ à estimer et de la position des points entre eux.
- ✓ Par l'utilisation du variogramme, tient compte de la continuité du phénomène étudié (effet de pépite, anisotropie, etc.).

II.4. Le Variogramme

La géostatistique a des visées plus modestes. On veut estimer des paramètres statistiques à partir des données et non imposer un modèle à priori qui aurait toutes les chances de s'avérer inadéquat. Les paramètres que l'on cherchera à estimer ne sont pas la fonction de distribution conjointe, ni même la fonction de distribution variable (i.e. les v.a. considérées deux à deux) mais simplement les deux premiers moments (moyenne, variance, covariance) des v.a. prises deux à deux. On ne peut donc estimer les paramètres statistiques sans formuler certaines hypothèses. Ces hypothèses ont uniquement pour but de permettre l'estimation des paramètres statistiques de notre modèle à partir des données. On les appelle hypothèses de stationnarité du second ordre ; elles visent essentiellement à "détacher" les deux premiers moments de localisations précises en permettant des translations des emplacements x et $x+h$. La covariance (et le Variogramme) devienne donc des fonctions dépendant uniquement de la distance séparant les points d'observation et non plus de leur localisation exacte.

II.4.1. Variogramme théorique

Le semivariogramme théorique est défini comme :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \text{Var}[Z(x) - Z(x+h)] = \frac{1}{2} E \left[(Z(x) - Z(x+h))^2 \right]$$

Cette fonction, habituellement croissante en fonction de h , synthétise beaucoup d'informations concernant le comportement conjoint des variables aléatoires et concernant "la continuité" de la minéralisation.

Ainsi, pour les modèles de variogramme montrant un seuil, on a (figure II.3.) :

A-Portée a : Distance où deux observations ne se ressemblent plus du tout en moyenne, elles ne sont plus liées (covariance nulle) linéairement. À cette distance, la valeur du variogramme correspond à la variance de la variable aléatoire.

B-Palier $\sigma^2 = c_0 + c$: Variance de la v.a. (Var (Z(x))) Écarts les plus grands, en moyenne entre deux v.a.

C- Effet de pépite c_0 : Variation à très courte échelle, erreurs de localisation, erreurs d'analyse et précision analytique.

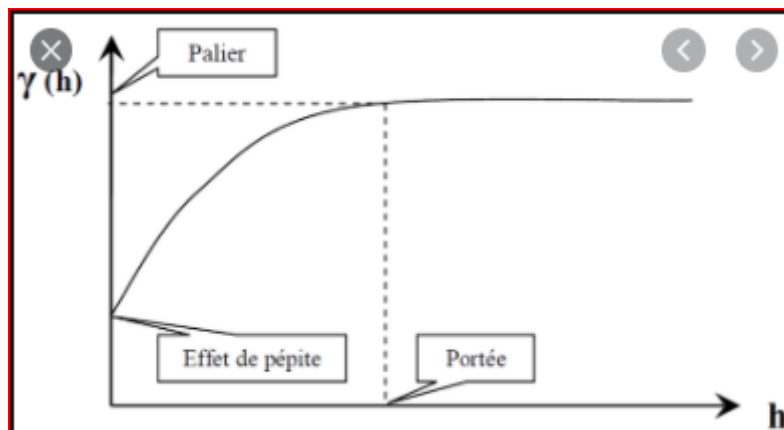


Figure II.3. Schéma type d'un variogramme

II.4.2. Le semivariogramme expérimentale

Dans la pratique, il n'est pas possible de calculer le variogramme théorique tel qu'il est décrit, car on ne dispose que des échantillons. Pour l'approcher une expression du semivariogramme expérimental est plus pratique. Le semivariogramme permet de mesurer la variabilité à différentes échelles d'une variable régionalisée (x), en calculant la différence entre deux échantillons x_1 et x_2 situées deux points z_1 et z_2 d'un domaine spatial. Cette différence notée s'écrit :

$$(\gamma_e) = \frac{(z_1 - z_2)}{2}$$

Pour voir si l'azimut décrit par les deux points considérés a un effet quelconque, on fait dépendre γ_e de la distance et de l'orientation de la paire de points.

$$\gamma_e = \frac{1}{2} (Z(x) - Z(x + h))^2$$

En formant la moyenne des dissemblances entre les valeurs pour toutes les $N(h)$ paires de points reliées par un vecteur h donné pour une maille donnée, on obtient la notion de semivariogramme expérimental.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_i^{N(h)} [(Z(x) - Z(x + h))^2]$$

Où : $N(h)$ représente le nombre de paires d'observations séparées par la distance h . (Graphique II.4.) :

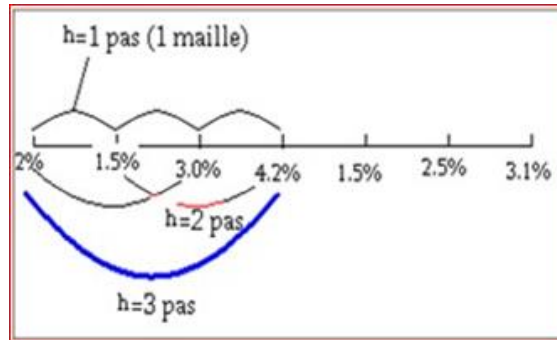


Figure II.4. Schéma de calcul du variogramme expérimental

On peut aussi calculer le variogramme selon certaines directions spécifiques à l'aide d'une expression particulière du variogramme :

$$\gamma(h, \theta) = \frac{1}{2N(h, \theta)} \sum_i^{N(h, \theta)} [(Z(x) - Z(x + h))^2]$$

$N(h, \theta)$: est le nombre de paires de points séparés d'une distance h dans la direction θ . (Figure II.5.) :

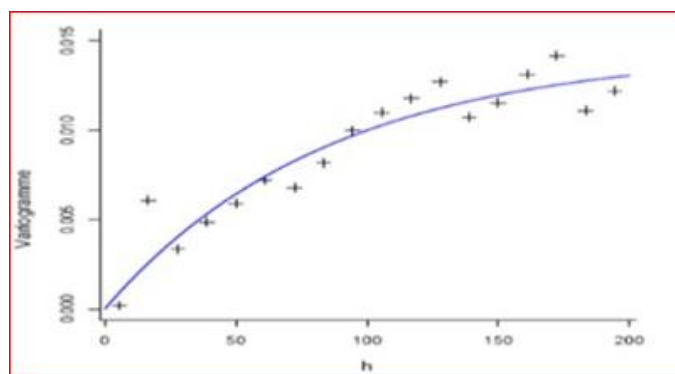


Figure II.5. Ajustement d'un modèle théorique (courbe) à un modèle expérimental (croix)

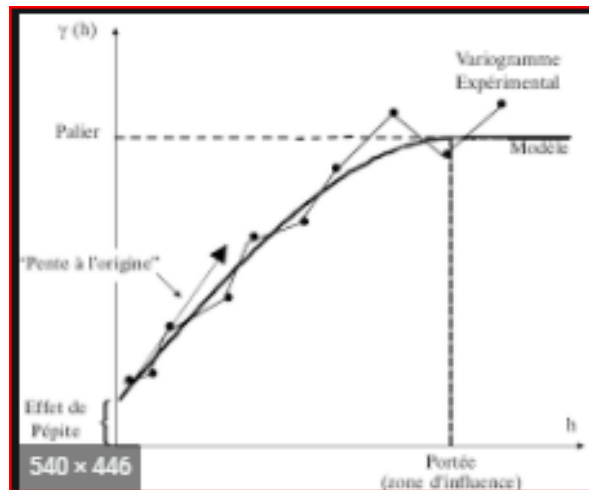


Figure II.6. Graphe d'un variogramme expérimental et son modèle d'ajustement

Il existe un nombre important de modèles de semivariogramme, nous mentionnons les plus importants aux modèles suivants :

A-Modèle exponentiel

$$\gamma(h) = C \left[1 - \exp\left(-3 \frac{h}{a}\right) \right]$$

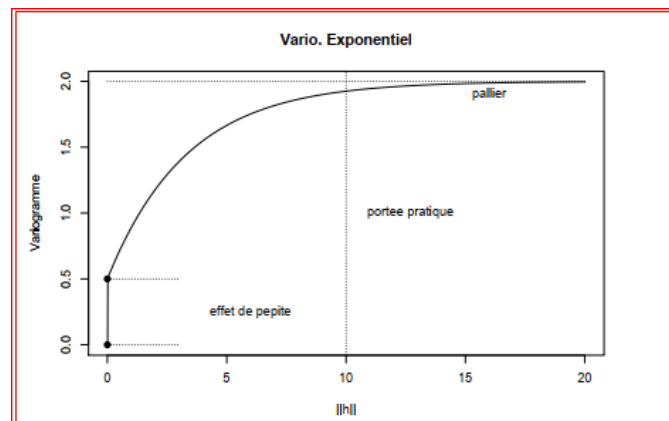


Figure II.7. Modèle type de semivariogramme exponentiel

B-Modèle gaussien :

$$\gamma(h) = C \left[1 - \exp\left(-3 \left(\frac{h}{a}\right)^2\right) \right]$$

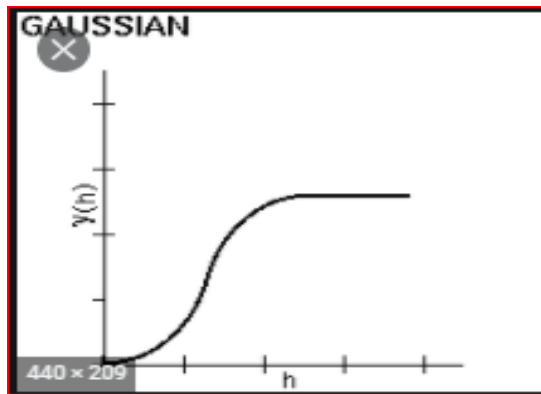


Figure II.8. Modèle type de semivariogramme gaussien

C-Modèle sphérique :

$$\gamma(h) = \begin{cases} c \left[\frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] & \text{si } 0 < h < a \\ C & \text{si } h \geq a \end{cases}$$

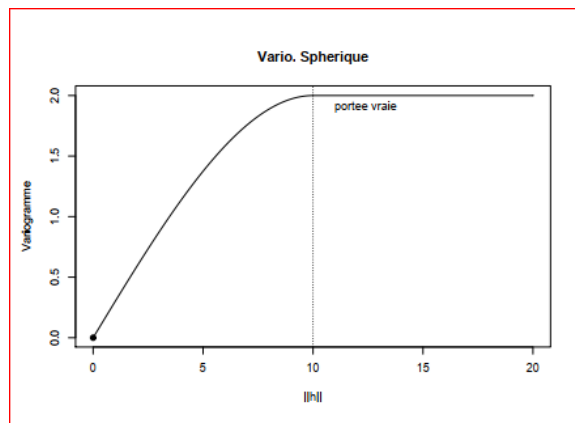


Figure II.9. Modelé type de semivariogramme sphérique

II.5. Conclusion

Les méthodes déterministes globales basées sur des propriétés purement géométriques de l'échantillon, ils permettent l'estimation de la moyenne sur un domaine donné d'une grandeur mesuré en différents points d'observation. Les méthodes déterministes locales sont aussi basées sur des propriétés purement géométriques de l'échantillon d'observation et ne permettent pas une évaluation de leur précision. Par le biais de fonctions de covariance et de variogramme, la géostatistique permet de modéliser la structure des phénomènes étudiés L'analyse variographique est une étape prépondérante. Elle va permettre dans un premier temps le calcul d'un variogramme expérimentale, et dans un second temps sa modélisation.

Chapitre Troisième

LE MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN

LE MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN

III.1. Introduction

Un Modèle numérique de terrain (MNT) correspond à une représentation sous forme numérique du relief d'une zone géographique. Ce modèle peut être composé d'entités vectorielles ponctuelles (points cotés), linéaires (courbes de niveau), surfaciques (facettes) ou représenté en mode raster (cellules).

III.2. La Grille du Modèle Numérique de Terrain (MNT)

Le MNT est constitué d'une grille régulière de points. A chaque point d'intersection de la grille est associée une altitude et la distance entre deux points voisins suivant les axes est appelé le pas du MNT (figure III.).

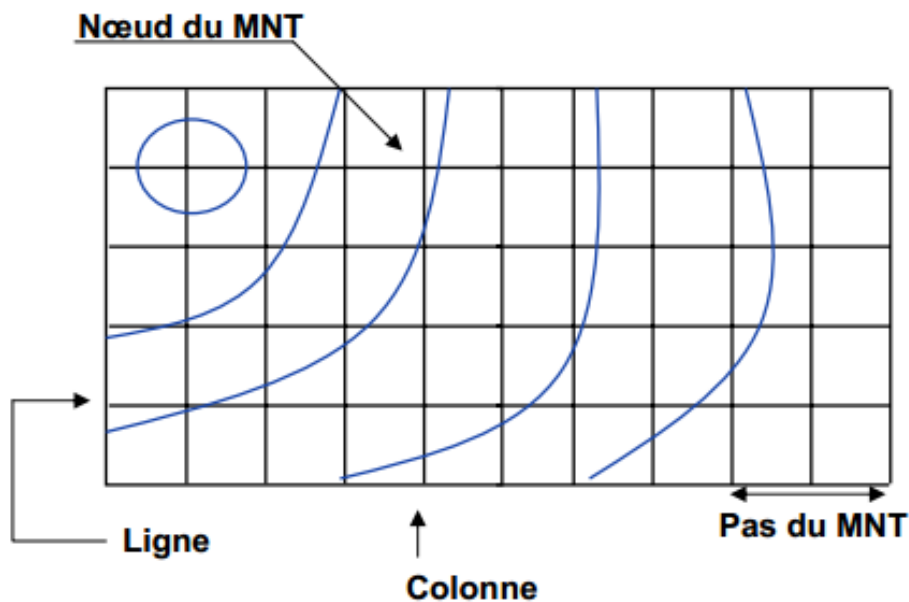


Figure III.1. Grille d'un modèle de terrain

III.3. Différents types de maillage

On peut distinguer les MNT selon le type de maillage utilisé :

- Maillage régulier carré (raster),
- Maillage triangulaire régulier,
- Maillage triangulaire quelconque (TIN)

La qualité d'un MNT dépend directement de l'intervalle du maillage et de la source des données à partir desquelles il est généré (figure III.2.).

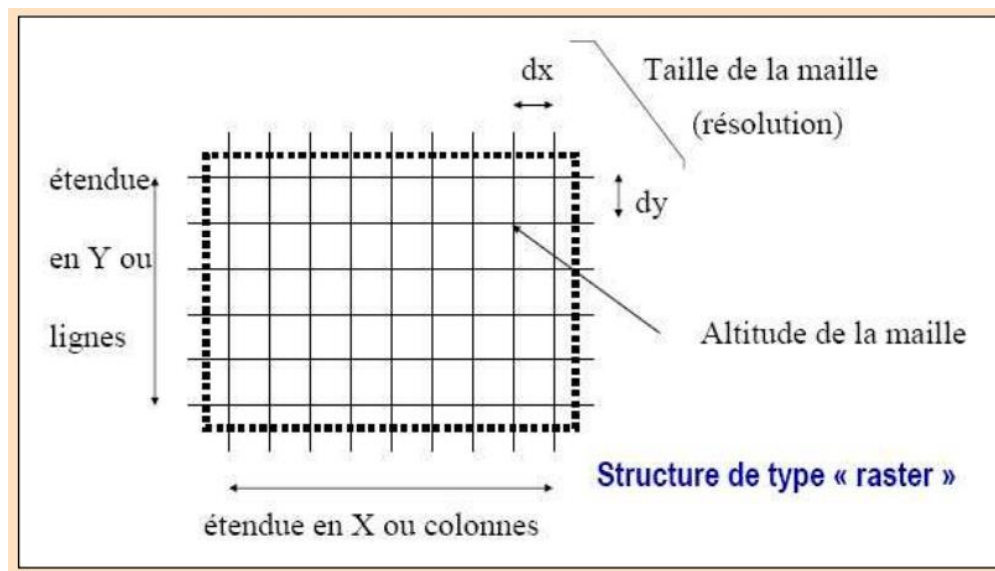


Figure III.2. Propriétés du Maillage

III.4. MNT ou MNE ou MNS

MNT ou MNE (modèle numérique d'élévation) / MNS (modèle numérique de sursol) ?

Un MNT représente la **surface théorique du sol** alors qu'un MNE / MNS représente la **surface théorique des points hauts** (ex : cime des arbres). Suivant la technique d'acquisition, on obtient un MNT ou un MNE / MNS... (Figure III.3.)

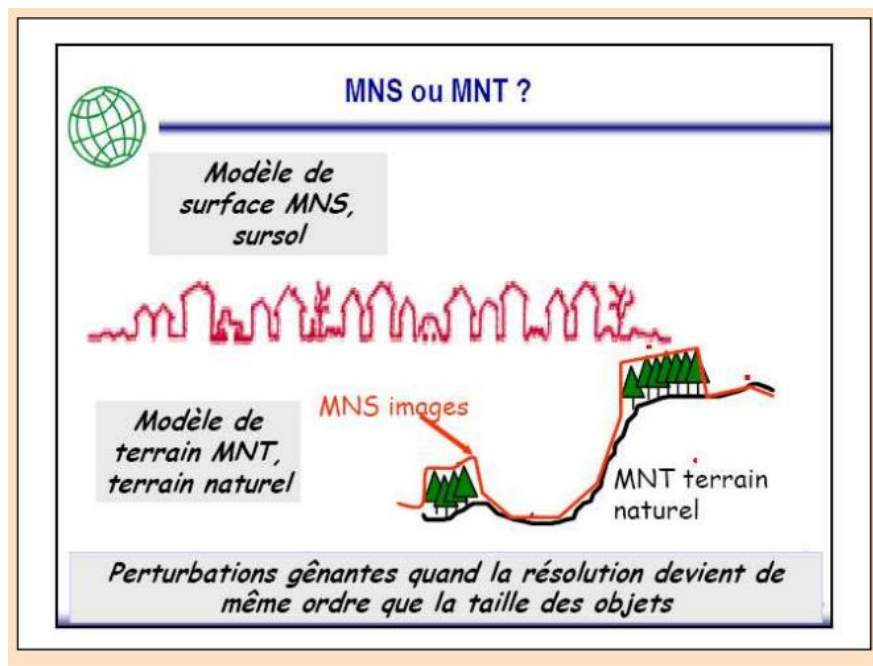


Figure III.3. Différents types de modèles numériques de terrain

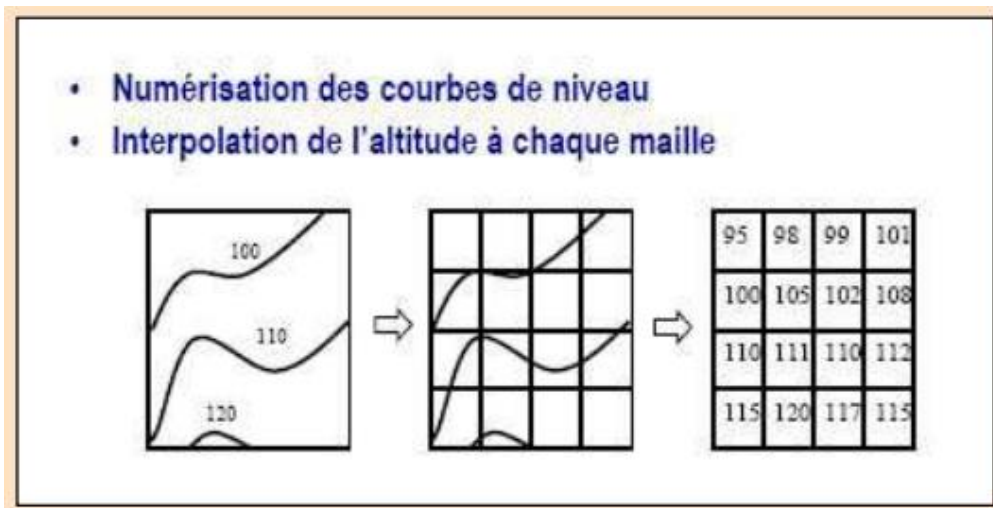
Autres appellations :

- Modèles numériques d'élévation = digital elevation model
- Modèles numériques d'élévation de terrain
- Modèles numériques altimétriques (MNA).

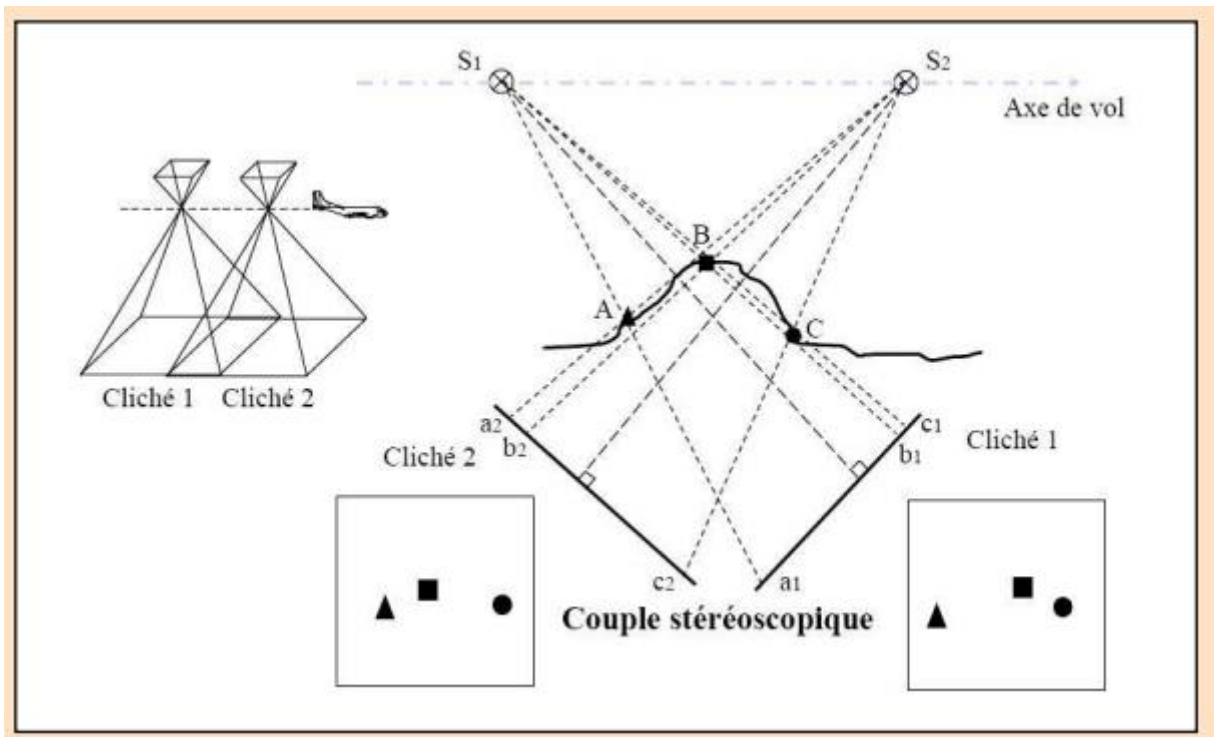
III.5. Acquisition des données altimétriques

Le recueillement des données altimétrique selon plusieurs façons :

- Saisie directe des coordonnées (x, y, z) des points du terrain : Levés sur le terrain ;
- Restitution photogrammétriques de photographies aériennes : Stéréoscopie (figure III.4. b) ;
- Corrélation automatique d'images satellitaires ;
- Numérisation (vectorisation) de courbes de niveau provenant de cartes (figure III.4.a).



a)



b)

Figure III.4. Recueilment des données altimétrique a/ Numérisation (vectorisation) b/ Stéréoscopie

III.6. Création du modèle numérique de terrain MNT

Les semis de points ou les courbes de niveaux obtenus lors des relevés GPS, peuvent être utilisés pour créer des modèles numériques de terrain, mais également des surfaces triangulaires telles que les TIN, à partir de méthodes d'interpolation.

A partir de points dispersés de manière homogène ou non, les méthodes d'interpolation vont créer une grille régulière où l'altitude sera estimée à partir des points les plus proches. Plusieurs méthodes, plus ou moins adaptées selon les cas, permettent de convertir ces données en une image maillée ou raster.

La précision du MNT va dépendre du semis de points, de sa répartition et de la résolution requise lors du traitement des données, mais elle est également fonction de la qualité des données initiales (levés de terrain, ...) et des processus de traitement de l'information.

Chapitre Quatrième

OUTILS NUMERIQUE UTILISE

OUTILS NUMERIQUE UTILISE

IV.1. Aperçu sur ArcMap d’ArcGIS Desktop

ArcMap, est l'une des deux principales applications SIG de bureau incluses dans la suite ArcGIS Desktop. Il est utilisé pour effectuer un large éventail de tâches SIG courantes ainsi que des tâches spécialisées et spécifiques à l'utilisateur.

ArcMap représente les informations géographiques sous la forme d'un ensemble de couches et d'autres éléments dans une vue cartographique. Il existe deux vues de carte principales dans ArcMap : la vue de données et la vue de mise en page.

Le bloc de données fournit une fenêtre géographique, ou un cadre cartographique, dans lequel on peut afficher et utiliser des informations géographiques sous la forme d'une série de couches cartographiques.

Le mode Mise en page fournit une vue de page dans laquelle les éléments cartographiques (tels que le bloc de données, une barre d'échelle, un titre de carte, une flèche nord, un texte descriptif, une légende de symbole, etc.) sont disposés sur une page pour l'impression de la carte.

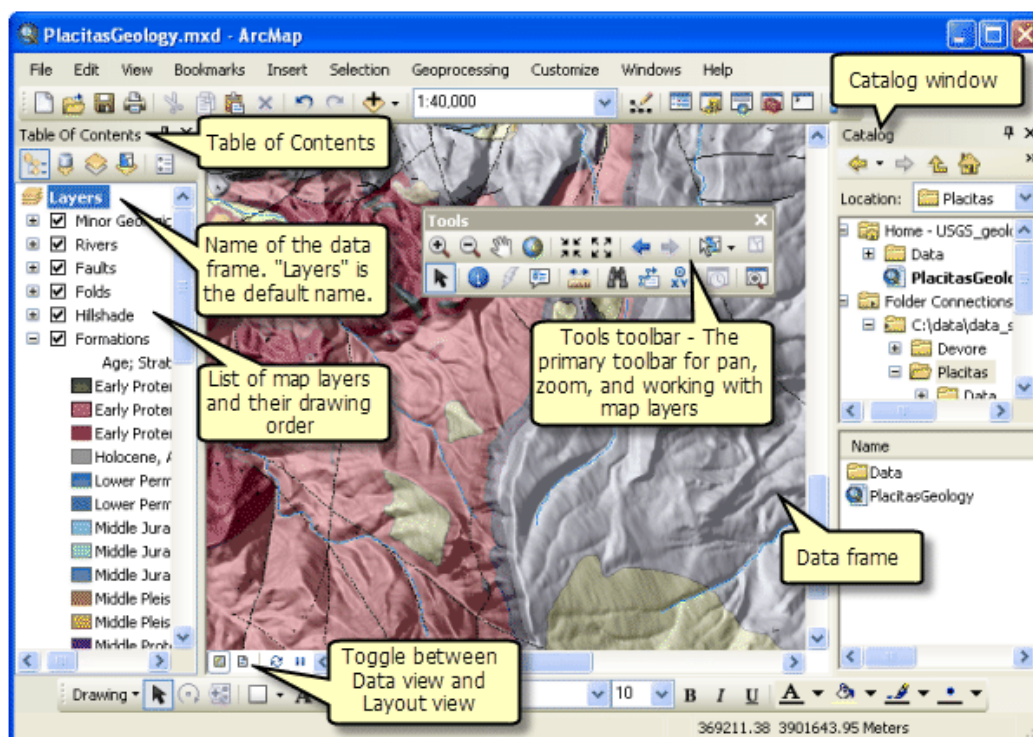


Figure IV.1. Interface graphique d’ArcMap version 10.8

IV.2. L'analyse exploratoire de données quantitatives

IV.2.1. Principe

Après avoir cartographié les données, une deuxième étape d'exploration des données doit être effectuée à l'aide des outils d'analyse exploratoire des données spatiales (Exploratory Spatial Data Analysis ESDA). Ces outils nous permettent d'examiner les données de manière plus quantitative que de les cartographier et nous permettent d'acquérir une compréhension plus approfondie des phénomènes que nous étudions afin que nous puissions prendre des décisions plus éclairées sur la manière dont le modèle d'interpolation doit être construit. Les tâches les plus courantes qu'on doit effectuer pour explorer nos données sont les suivantes :

- Examinez la distribution de nos données
- Rechercher des valeurs aberrantes globales et locales
- Recherchez les tendances globales
- Examiner les variations locales
- Examiner l'autocorrélation spatiale

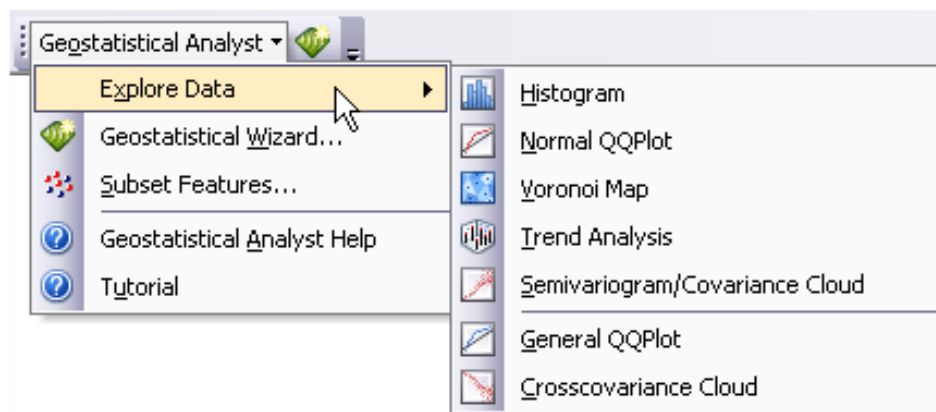


Figure IV.2. Fenêtre exploration des données dans ArcMap

IV.2.2. Les outils ESDA

Les outils ESDA sont :

- Histogramme
- Tracé QQ normal et tracé QQ général
- Analyse de tendance
- Carte de Voronoï
- Nuage de semivariogramme/covariance

IV.2.2.1. Histogramme

L'outil Histogramme fournit une description univariée (une variable) de vos données. La boîte de dialogue de l'outil affiche la distribution de fréquence pour l'ensemble de données d'intérêt et calcule des statistiques récapitulatives.

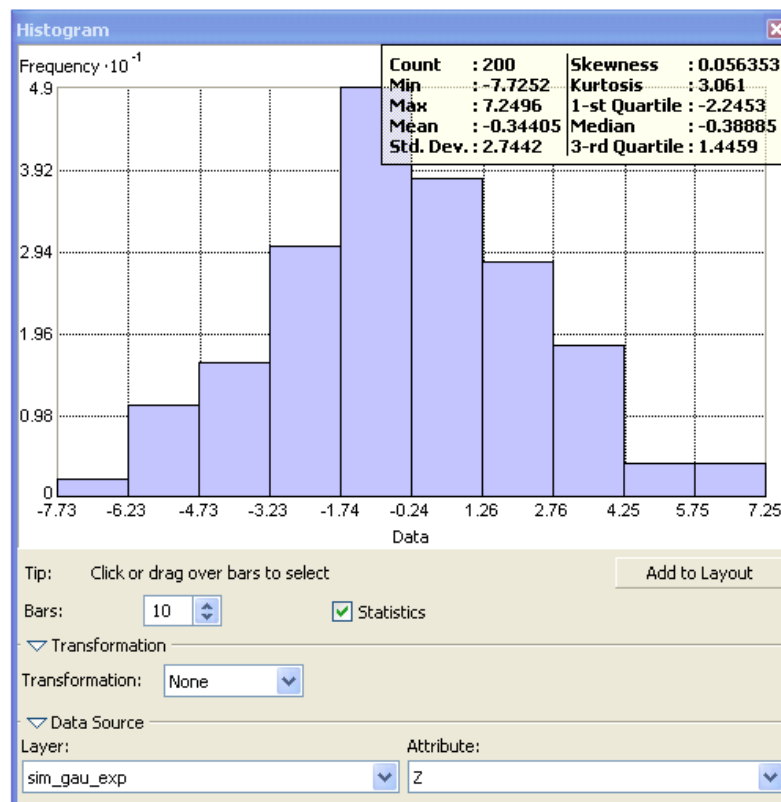


Figure IV.3. Exemple de boîte de dialogue Histogramme

IV.2.2.2. QQ Plot (quantile-quantile)

Les points du tracé QQ normal fournissent une indication de la normalité univariée de l'ensemble de données. Si les données sont distribuées normalement, les points tomberont sur la ligne de référence à 45 degrés. Si les données ne sont pas distribuées normalement, les points s'écarteront de la ligne de référence.

Dans le diagramme ci-dessous, les valeurs de quantile de la distribution normale standard sont tracées sur l'axe des x dans le tracé QQ normal, et les valeurs de quantile correspondantes de l'ensemble de données sont tracées sur l'axe des y. Vous pouvez voir que les points se situent à proximité de la ligne de référence à 45 degrés. Le principal écart par rapport à cette ligne se produit à des valeurs élevées de concentration d'ozone.

L'outil Normal QQ Plot nous permet de sélectionner les points qui ne sont pas proches de la ligne de référence. L'emplacement des points sélectionnés est ensuite mis en surbrillance dans la vue

des données d'ArcMap. Comme on le voit ci-dessous, ils sont concentrés autour de la région de la baie de San Francisco (points ombrés en rose sur la carte ci-dessous).

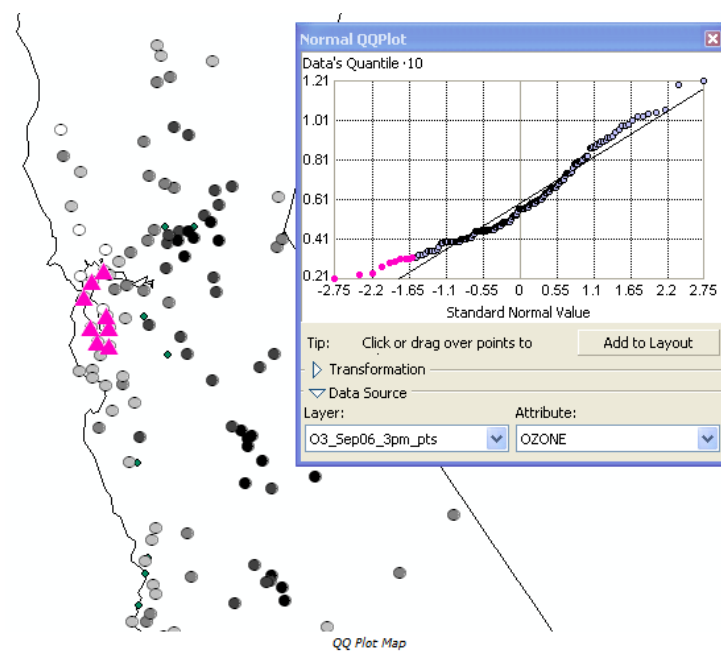


Figure IV.4. Carte graphique quantile-quantile (QQ)

IV.2.2.3. Analyse des tendances

L'outil d'analyse des tendances peut aider à identifier les tendances dans l'ensemble de données d'entrée.

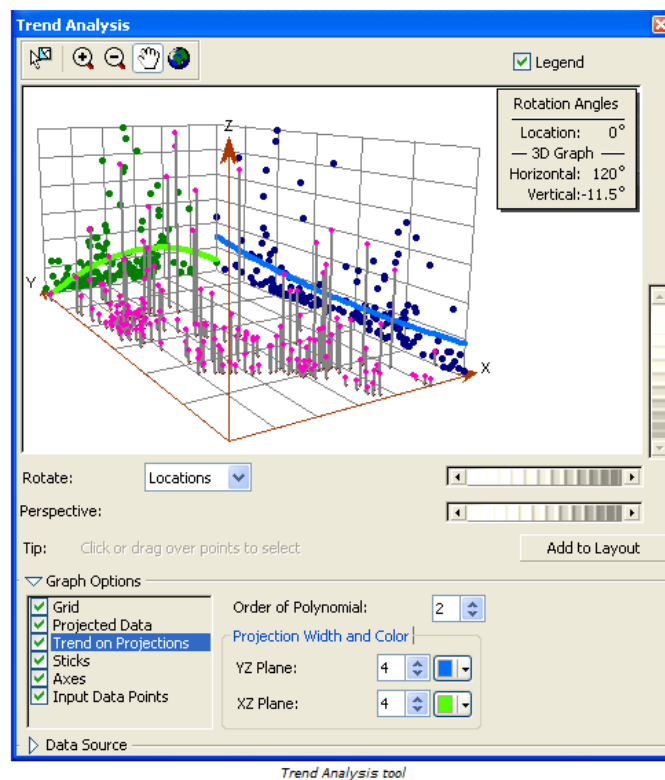


Figure IV.5. Fenêtre outils d'analyse des tendances

L'outil d'analyse des tendances fournit une perspective tridimensionnelle des données. Les emplacements des points d'échantillonnage sont tracés sur le plan x, y. Au-dessus de chaque point d'échantillonnage, la valeur est donnée par la hauteur d'un bâton dans la dimension z. Une caractéristique unique de l'outil d'analyse de tendance est que les valeurs sont ensuite projetées sur le plan x, y et le plan y, z sous forme de nuages de points. Cela peut être considéré comme des vues latérales à travers les données tridimensionnelles. Les polynômes sont ensuite ajustés à travers les nuages de points sur les plans projetés. Une fonctionnalité supplémentaire est qu'on peut faire pivoter les données pour isoler les tendances directionnelles.

IV.2.2.4. Cartes de Voronoi

Les cartes de Voronoi sont construites à partir d'une série de polygones formés autour de l'emplacement d'un point d'échantillonnage.

Les polygones de Voronoi sont créés de sorte que chaque emplacement dans un polygone soit plus proche du point d'échantillonnage dans ce polygone que tout autre point d'échantillonnage. Une fois les polygones créés, les voisins d'un point d'échantillonnage sont définis comme tout autre point d'échantillonnage dont le polygone partage une bordure avec le point d'échantillonnage choisi. Par exemple, dans la figure suivante, le point d'échantillonnage vert clair est entouré d'un polygone, qui a été surligné en rouge. Chaque emplacement dans le polygone rouge est plus proche du point d'échantillonnage vert clair que de tout autre point d'échantillonnage (indiqué par de petits points bleu foncé). Les polygones bleus partagent tous une bordure avec le polygone rouge, de sorte que les points d'échantillonnage dans les polygones bleus sont voisins du point d'échantillonnage vert clair.

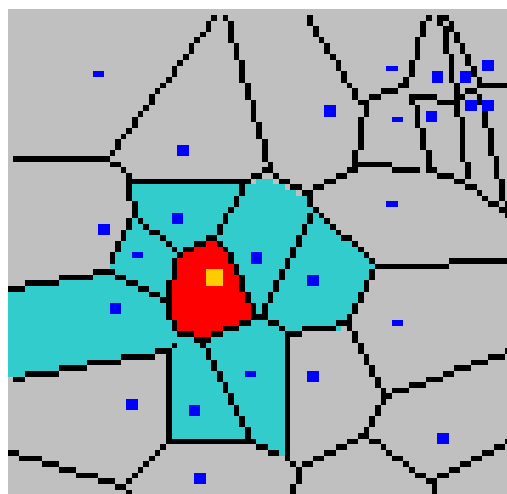


Figure IV.6. Exemple de carte de Voronoi

IV.2.2.5. Semivariogramme

L'outil Semivariogramme/Nuage de covariance affiche les valeurs empiriques de semivariogramme et de covariance pour toutes les paires d'emplacements dans un jeu de données et les trace en fonction de la distance qui sépare les deux emplacements.

IV.3. Les méthodes d'interpolation spatiale implémentées dans ArcGIS

IV.3.1. Les méthodes d'interpolation déterministes

IV.3.1.1. La pondération par distance inverse (IDW)

La pondération par distance inverse (IDW) est un interpolateur déterministe rapide et exact. Il y a très peu de décisions à prendre concernant les paramètres du modèle. Il peut s'agir d'un bon moyen de jeter un premier coup d'oeil à une surface interpolée. Cependant, il n'y a pas d'évaluation des erreurs de prédiction, et IDW peut produire des "yeux de boeuf" autour des emplacements des données. Aucune hypothèse n'est requise concernant les données.

IV.3.1.2. Global Polynomial (GPI)

Global Polynomial (GPI) est un interpolateur déterministe rapide qui est lisse (inexact). Il y a très peu de décisions à prendre concernant les paramètres du modèle. Il est le mieux utilisé pour les surfaces qui changent lentement et progressivement. Cependant, il n'y a pas d'évaluation des erreurs de prédiction et il peut être trop lisse. Les emplacements au bord des données peuvent avoir un effet important sur la surface. Aucune hypothèse n'est requise pour les données.

IV.3.1.3. Les fonctions à base radiale (RBF)

Les fonctions à base radiale (RBF) sont des interpolateurs déterministes modérément rapides et exacts. Ils sont beaucoup plus flexibles que l'IDW, mais il y a plus de décisions de paramètres. Il n'y a pas d'évaluation des erreurs de prédiction. La méthode fournit des surfaces de prédiction qui sont comparables à la forme exacte du krigeage.

Les fonctions de base radiale ne permettent pas d'étudier l'autocorrélation des données, ce qui la rend moins flexible et plus automatique que le krigeage. Les fonctions de base radiale ne font aucune hypothèse sur les données.

IV.3.1.4. Le polynôme local (LPI)

Le polynôme local (LPI) est un interpolateur modérément rapide qui est lisse (inexact). Il est plus flexible que la méthode polynomiale globale, mais il y a plus de décisions à prendre concernant les paramètres. La méthode fournit des surfaces de prédiction, d'erreurs standard de prédiction et de nombre de conditions qui sont comparables au krigeage ordinaire avec des erreurs de mesure. La méthode polynomiale locale ne permet pas d'étudier l'autocorrélation des données, ce qui la rend moins flexible et plus automatique que le krigeage. Aucune hypothèse n'est requise concernant les données.

IV.3.2. Interpolation avec barrières

IV.3.2.1. Lissage du noyau

L'interpolation à noyau avec barrières est un prédicteur à fenêtre mobile qui utilise la distance la plus courte entre les points de sorte que les points situés de part et d'autre des barrières linéaires soient reliés.

IV.3.2.2. Le noyau de diffusion

Le noyau de diffusion utilise un noyau basé sur l'équation de la chaleur et permet d'utiliser une combinaison de jeux de données raster et d'entités pour agir comme une barrière.

IV.3.3. Les méthodes d'interpolation géostatistiques

IV.3.3.1. L'interpolation aréolaire

L'interpolation aréolaire est une méthode d'interpolation basée sur le krigeage qui prend en compte des données polygonales de formes diverses.

Les données peuvent se présenter sous trois formes :

Premièrement, des données gaussiennes dont la moyenne est calculée sur des polygones. Deuxièmement, des données binomiales indiquant le nombre de réussites et le nombre d'essais par polygone.

Troisièmement, des données de Poisson comptant le nombre d'événements dans un polygone pendant un temps donné. Surfaces d'interpolation aréolaire pour les prédictions et l'erreur standard de prédiction.

IV.3.3.2. Le krigeage empirique bayésien

Le krigeage empirique bayésien est une méthode d'interpolation basée sur le krigeage qui tient compte de l'incertitude dans l'estimation des semivariogramme en simulant de nombreux semivariogramme à partir des données d'entrée. En outre, le krigeage bayésien empirique peut tenir compte d'une non-stationnarité modérée en construisant des modèles locaux sur des sous-ensembles des données d'entrée.

IV.3.3.3. Le krigeage

Le krigeage est un interpolateur qui peut être exact ou lissé en fonction du modèle d'erreur de mesure. Il est très flexible et permet d'étudier les graphiques d'autocorrélation spatiale et de corrélation croisée. Le krigeage utilise des modèles statistiques qui permettent une variété de surfaces de sortie, notamment les prédictions, l'erreur standard de prédiction, la probabilité et le quantile. La flexibilité du krigeage peut nécessiter une grande prise de décision. Le krigeage suppose que les données proviennent d'un processus stochastique stationnaire, et certaines méthodes supposent des données normalement distribuées.

IV.3.3.4. Variographie

L'ajustement d'un modèle, ou modélisation spatiale, est également connu sous le nom d'analyse structurelle ou variographie. Dans la modélisation spatiale de la structure des points mesurés, on commence par un graphique du semivariogramme empirique, calculé avec l'équation suivante pour toutes les paires d'emplacements séparés par la distance h :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \text{moyenne}(valeur_i - valeur_j)^2$$

IV.3.3.5. La formule de krigeage

Le krigeage est similaire à IDW en ce sens qu'il pondère les valeurs mesurées environnantes pour dériver une prédiction pour un emplacement non mesuré. La formule générale pour les deux interpolateurs est formée comme une somme pondérée des données :

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i)$$

Où :

$Z(s_i)$ = la valeur mesurée au i ème emplacement

λ_i = un poids inconnu pour la valeur mesurée au i ème emplacement

s_0 = emplacement de prédiction

N = le nombre de valeurs mesurées

IV.3.3.6. Les techniques de krigeage

a. Le krigeage simple

Le krigeage simple suppose ce modèle :

$$Z(s) = \mu + \varepsilon(s)$$

Où

μ est une constante **connue** (moyenne).

$\varepsilon(s)$: Erreurs aléatoires

b. Le krigeage ordinaire

Le krigeage ordinaire suppose le modèle

$$Z(s) = \mu + \varepsilon(s),$$

Où μ est une constante **inconnue**(moyenne).

L'un des principaux problèmes concernant le krigeage ordinaire est de savoir si l'hypothèse d'une moyenne constante est raisonnable. Il existe parfois de bonnes raisons scientifiques pour rejeter cette hypothèse. Cependant, en tant que méthode de prédiction simple, elle présente une flexibilité remarquable. La figure suivante est un exemple dans une dimension spatiale :

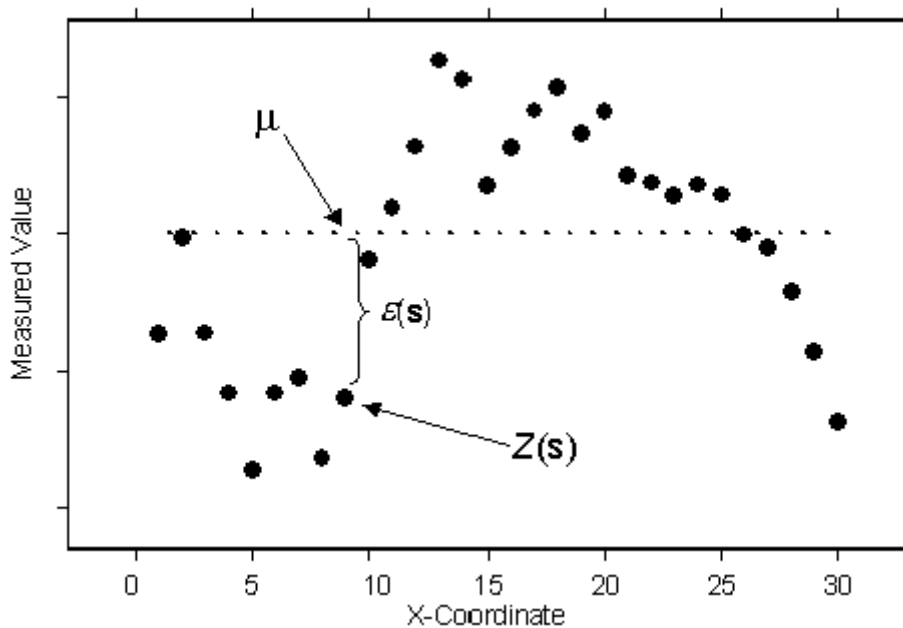


Figure IV.7. Exemple de krigeage ordinaire à une dimension spatiale

c. Le krigeage universel

Le krigeage universel suppose le modèle

$$Z(s) = \mu(s) + \varepsilon(s),$$

Où $\mu(s)$ est une fonction déterministe (moyenne variable selon la position s).

Par exemple, dans la figure suivante, qui contient les mêmes données que celles utilisées pour les concepts de krigeage ordinaires, les données observées sont données par les cercles pleins.

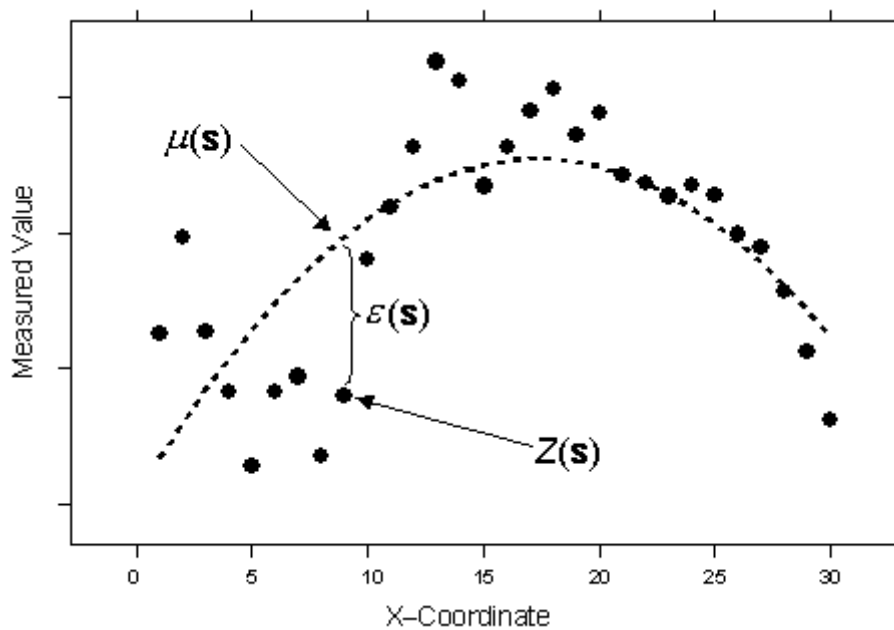


Figure IV.8. Exemple de krigeage universel

Deuxième Partie

SIMULATION NUMERIQUE

Chapitre cinquième

***APPLICATION A L'ETABLISSEMENT DU MNT
DE LA COMMUNE DE HAMMAM DALAA***

APPLICATION A L'ETABLISSEMENT DU MNT DE LA COMMUNE DE HAMMAM DALAA

V.1. Présentation de la zone d'étude

Hamam Dalaâ est une commune de la wilaya de M'Sila en Algérie, elle occupe une superficie de 382,62722 Km², et délimitée par les coordonnées énumérées ci-dessous : 35° 55' 41" Nord, 4° 22' 28" Est (figure V.1.).

Limité par Ouanougha à l'ouest, Tarmount et Ouled Mansour au sud et par la wilaya de Bordj Bou Arréridj à l'Est et au Nord.

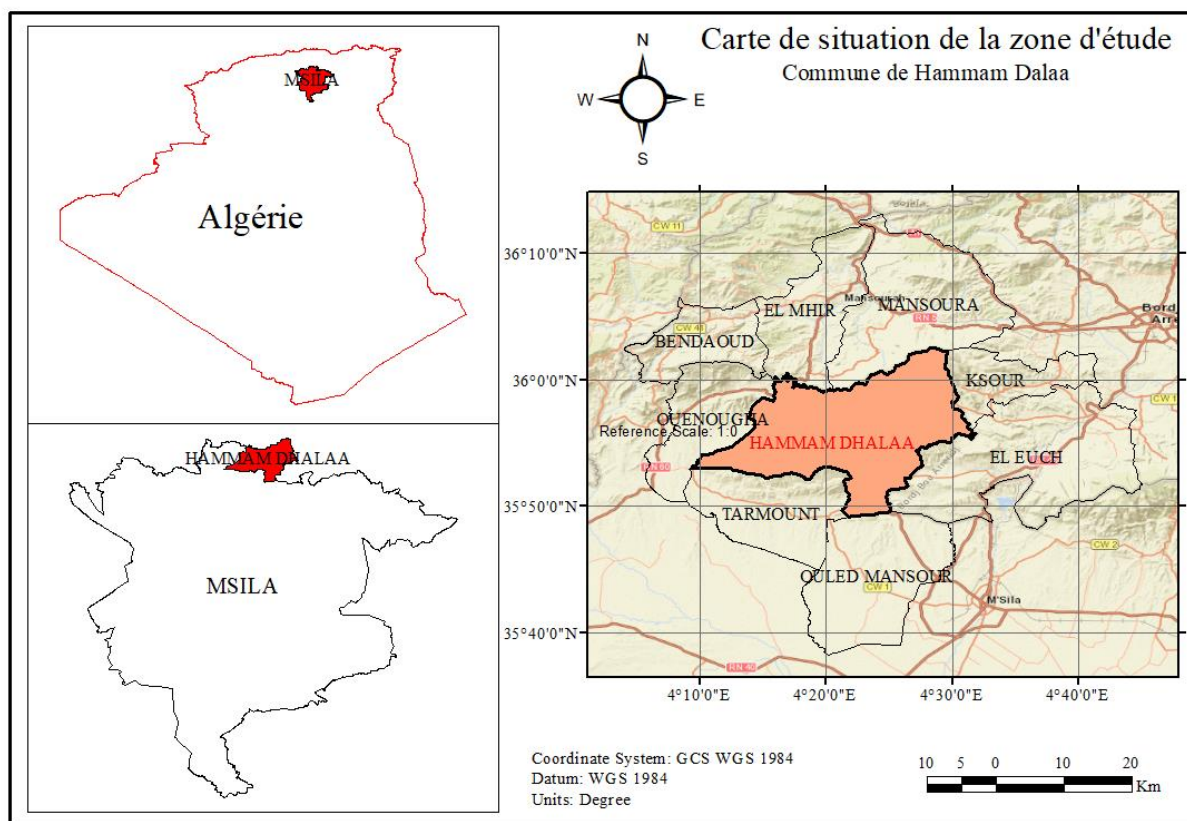


Figure V.1. Localisation de la zone d'étude commune de Hammam Dalaâ

El- Haourane et ses environs sont formés par un cadre montagneux composant la partie Nord-Est de la carte géologique du Tarmount (N140, 1963-1964), caractérisés par la stratigraphie Quaternaire récent, Tertiaire, Secondaire et le Crétacé.

Les moyennes des précipitations annuelles enregistrés (1988-2004) sont : 214 mm à la station de M'Sila, et 47 Les moyennes des températures mensuelles sont les plus basses en Janvier et les plus élevés en Juillet.

Les températures moyennes annuelles sont respectivement de 19,1C α la station de M'Sila et 15,4C α 1100m d'altitudes à la zone d'étude.

Dans la région du Hammam Dalaa, la durée d'enneigement est de 10 J/an pendant la période hivernale.

Le climat est d'autant plus humide que le quotient pluviothermique d'Emberger (Q2) est élevé. La station de M'Sila appartient à l'étage bioclimatique aride à hiver tempéré et la zone d'étude se trouve dans une ambiance bioclimatique semi-aride frais 7mm à 1100m d'altitude au niveau du canton El Haourane.

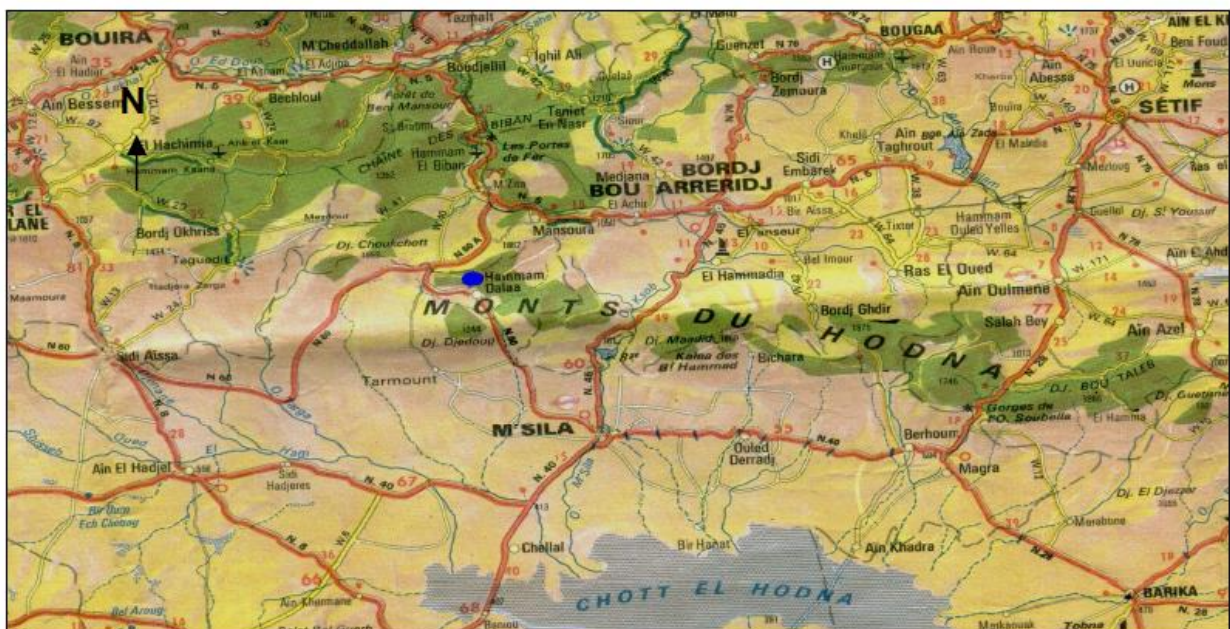


Figure V.2. Localisation géographique du canton El Haourane (Carte touristique. ONAT) (Rebbas & Bounar, 2012)

V.2. Recueillement des données

V.2.1. Données graphiques

Les limites administratives de la commune de Hammam Dalaa, de la wilaya de Msila et de toutes l'Algérie sont fournies sous fichiers de forme dite « Shapefile », téléchargé à partir du site « OpenStreetMap » sur le lien <https://www.openstreetmap.org/#map=5/28.413/1.653>. Ou à partir de la page GEOMATIK sur le lien <http://www.gadm.org/country>.

V.2.2. Données tabulaires

Les données attributaires sont importées sous format d'un fichier texte (N, x, y) à partir d'un fichier Google earth de forme (KML) en deux dimensions.





Les altitudes des points sont obtenues à l'aide d'un utilitaire en ligne (**GPS Visualiser**) comme représenté sur le tableau V.1.

Tableau V.1. Extrait de la table des données format EXCEL

Pt	Longitude	Latitude	Z (m)
1	4,4717	36,0425	1640
2	4,4719	36,0425	1637
3	4,4714	36,0422	1649
4	4,4717	36,0422	1645
...

Le processus de traitement des données s'effectue depuis l'entrée jusqu'à l'obtention de la carte en sortie comme encadré dans le tableau V.2.

Tableau V.2. Processus de traitement des données depuis l'entrée à la sortie

Outils numérique				
Type de fichier	KML	XLSX	CSV	MXD
Type de données	Vecteur	Table	Table	Carte

V.3. Analyse exploratoire de la série des altitudes des points mesurés :

A l'aide du logiciel ArcMap on détermine directement les paramètres statistiques de la colonne altitude du fichier d'entrée.

V.3.1 Paramètres statistiques

Les paramètres statistiques de position et de dispersion de la série statistique valeurs des altitudes sont encadrés dans le tableau V.3. :

Tableau V.3. Indicateurs de la série statistique Altitudes

Paramètre	Min	Max	Moyenne	Médiane	Ecart type	Coefficient d'asymétrie	Coefficient d'aplatissement
Valeur	598	1854	927,18	889	217,09	1,56	5,99

V.3.2 Histogramme

L'histogramme la série statistique valeurs des altitudes est schématisé sur la figure V.3 :

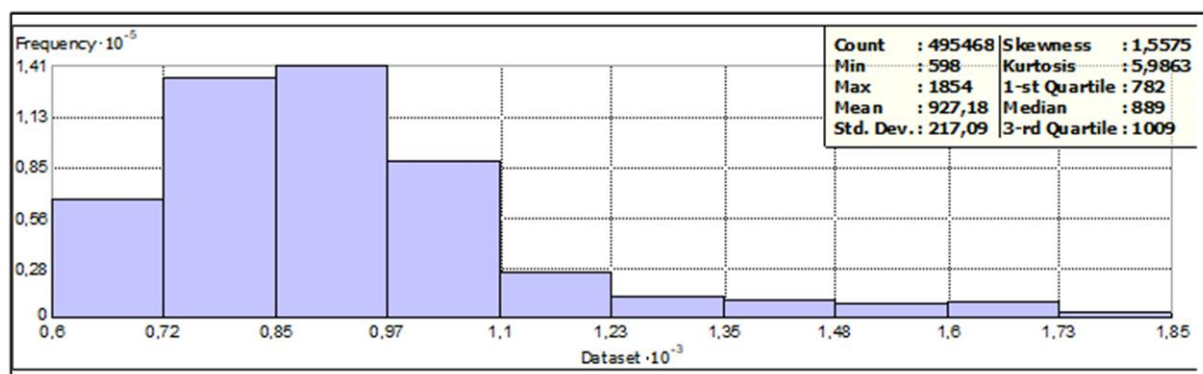


Figure V.3. Histogramme la série statistique Altitudes

V.3.3 QQPlot

Le diagramme Quantile- Quantile QQPlot de la série statistique valeurs des altitudes est schématisé sur la figure V.4 Permet d'évaluer la pertinence de l'ajustement d'une distribution donnée à un modèle théorique. Il suit une loi normale d'espérance μ et d'écart type σ .

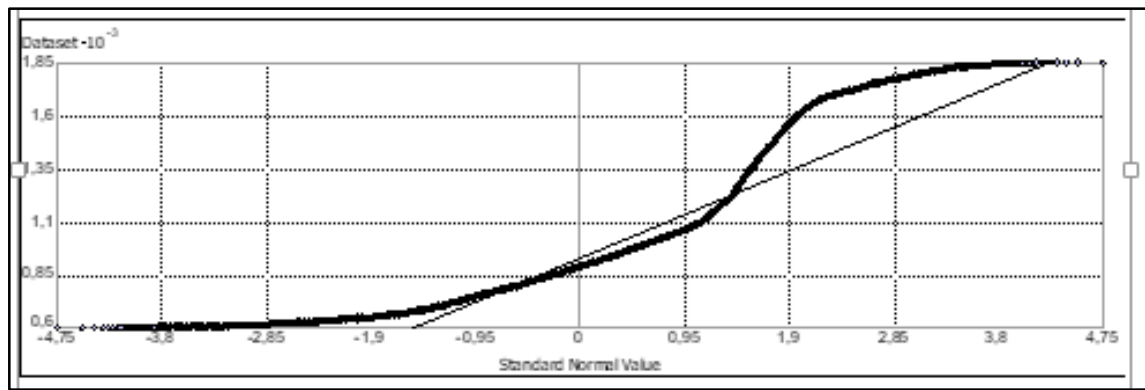


Figure V.4. QQ plot de la série statistique Altitudes

V.3.4 Analyse de tendances « Trend Analysis »

Sur les deux plans l'allure de la représentation graphique des tendances est courbe, donc l'analyse est biaisée par d'autres phénomènes figure V.5.

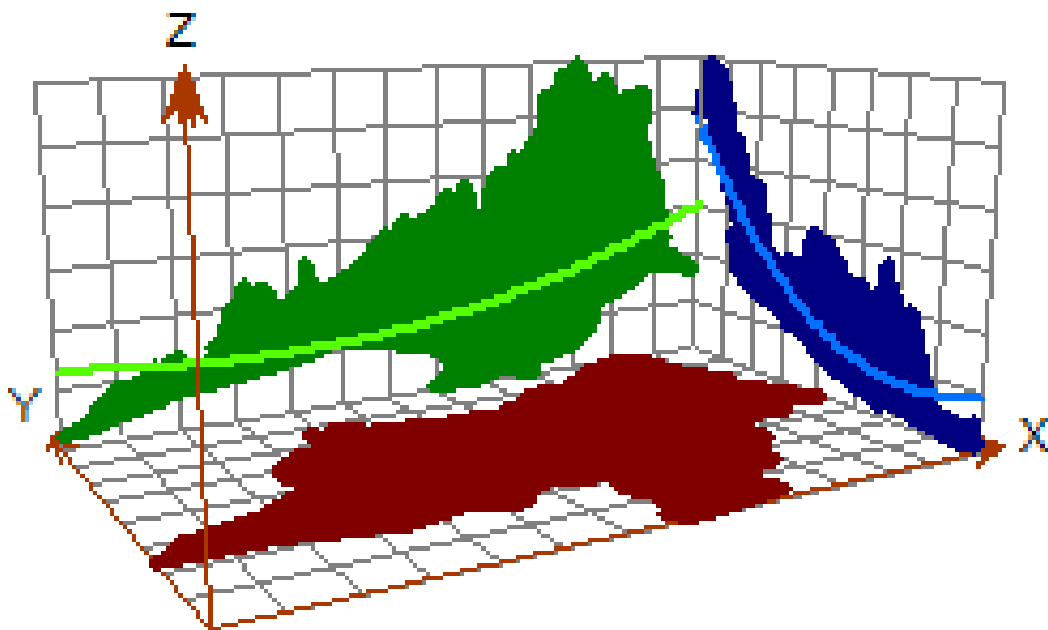


Figure V.5. Statistique de la série d'altitudes

V.3.5 justification du choix de la méthode d'interpolation

L'histogramme est uniforme (presque symétrique), le QQ plot est proche de la droite donc la distribution est uniforme, l'allure de l'analyse des tendances est courbe, ce qui prouve l'existence de d'autres phénomènes autre que les altitudes qui perturbent l'interpolation (biais). Selon ces remarques, la méthode conseillée pour l'interpolation est la méthode géostatistique par krigeage.

V.4. La prédiction Spatiale des altitudes

Pour déterminer les altitudes des points « non mesurée » à partir des « points mesurées » on a utilisé les méthodes d'interpolation implémentées dans le logiciel ArcGIS 10.8.

V.4.1. Les étapes de l'interpolation spatiale

Pour prédire les valeurs des altitudes inconnues des points de la surface étudiée on doit suivre les étapes suivantes :

- importer le fichier Excel données dans le logiciel ;
- l'affichage graphique des points (x, y) ;
- export du nuage de points en fichier de forme (shapefile) ;
- le choix de la méthode d'interpolation (déterministes ou géostatistique) ;
- pour le Krigeage l'ajustement du variogramme correspondant ;
- génération de la carte (contour) ou tous autres formats de représentation.

V.4.2. Interpolation par la méthode Krigeage

Pour comparer les résultats de l'interpolation par krigeage, on a choisi le modèle sphérique pour le semivariogramme.

V.4.2.1. Méthode de Krigeage Simple

La carte de prédiction des altitudes en mode dégradé obtenue par la méthode d'interpolation de type géostatistique, par krigeage simple est schématisée sur la figure V.6.

La carte de prédiction des altitudes en mode deux bandes qu'on utilise pour créer les cartes des pentes, d'aspect, d'exposition et les différentes cartes d'hydrologie est schématisée sur la figure V.7.

Modèle Numérique de Terrain (DEM) de la commune de Hammam Dalaa

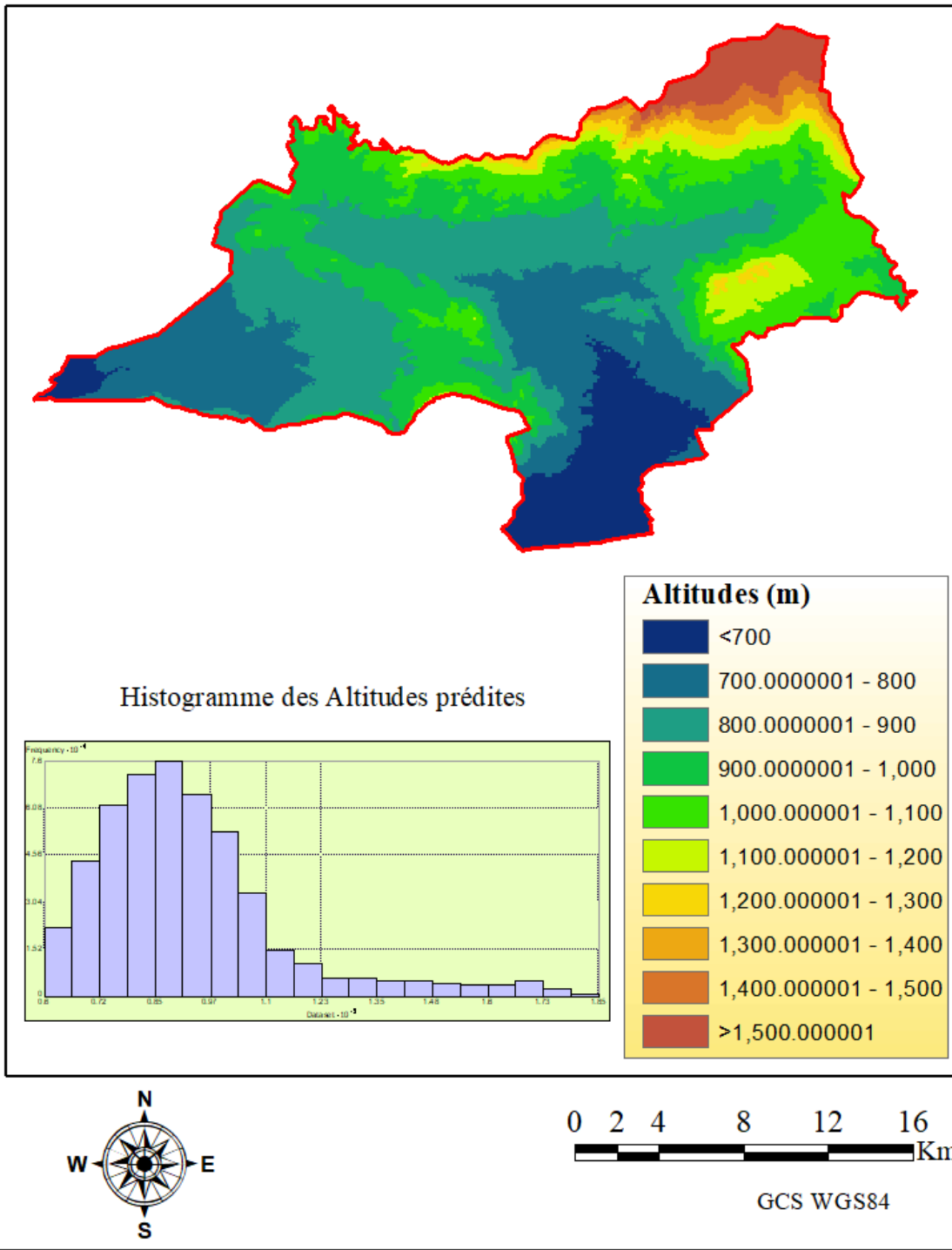


Figure V.6. Carte MNT en dégradé par la méthode de Krigeage Simple

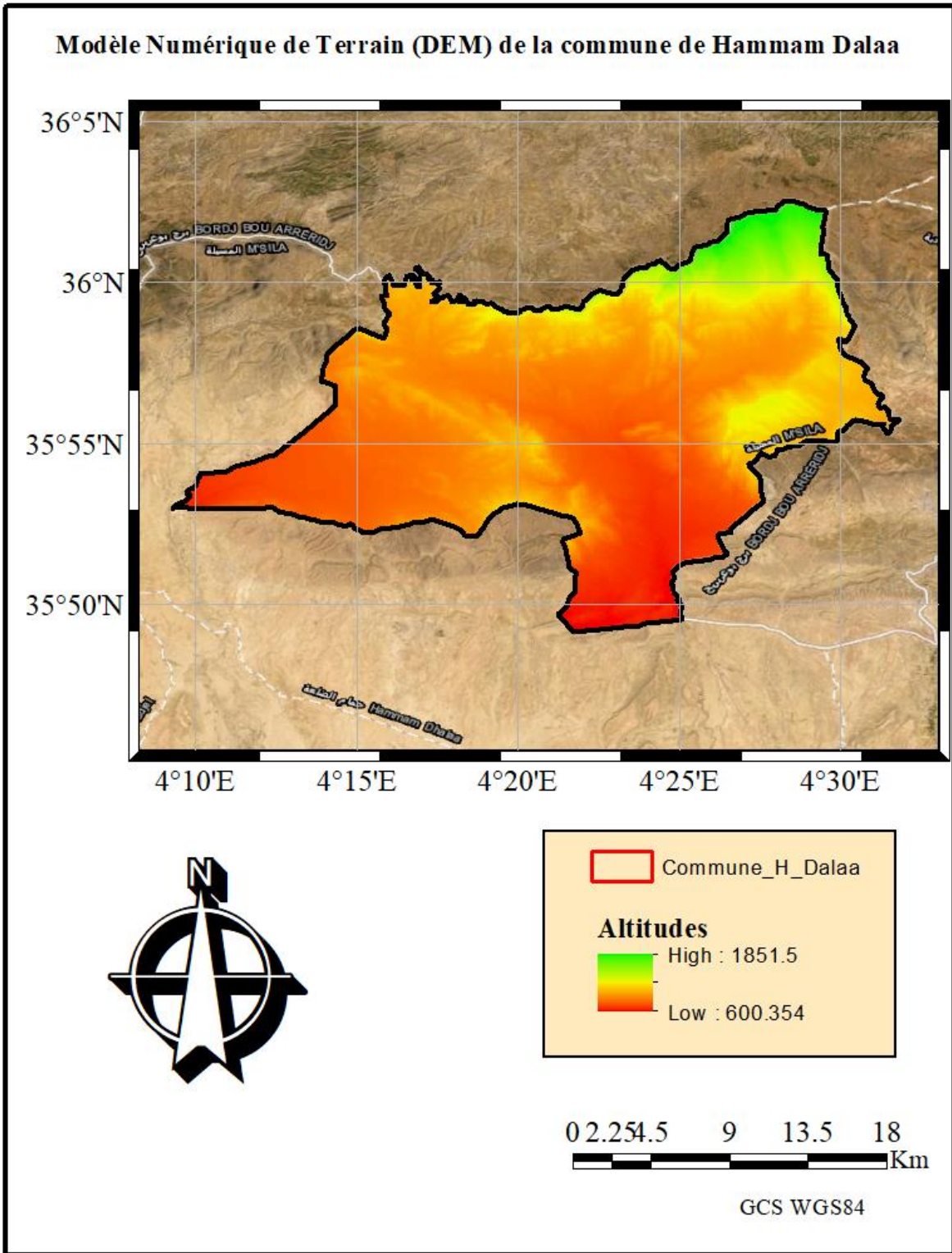


Figure V.7. Carte MNT en deux bandes par la méthode de Krigeage Simple

V.4.2.2. Méthode de Krigeage Ordinaire

Le krigeage ordinaire est la méthode la plus utilisée en pratique, et pour cette raison une étude détaillée a été faite dans notre recherche.

Après réalisation et ajustement par un variogramme de modèle sphérique dont les caractéristiques sont schématisées sur la figure V.8. Une interpolation par Krigeage est effectuée pour obtenir le modèle numérique du terrain sous forme de courbe de niveau (figure V.9.).

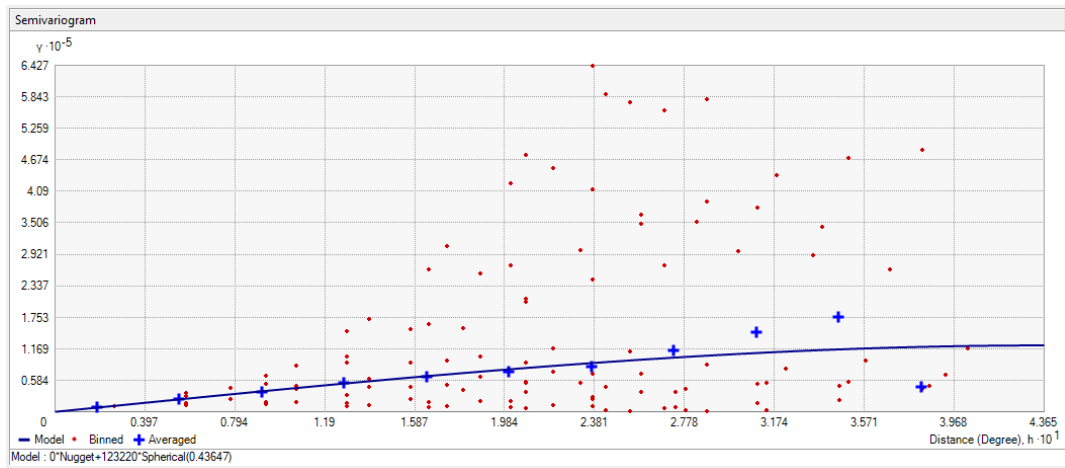


Figure V.8. Ajustement par un variogramme de modèle sphérique

L'erreur moyenne quadratique « Root Mean Saure Error » commise sur l'interpolation par krigeage ordinaire est $RMS=0,7540$ (figure V.9).

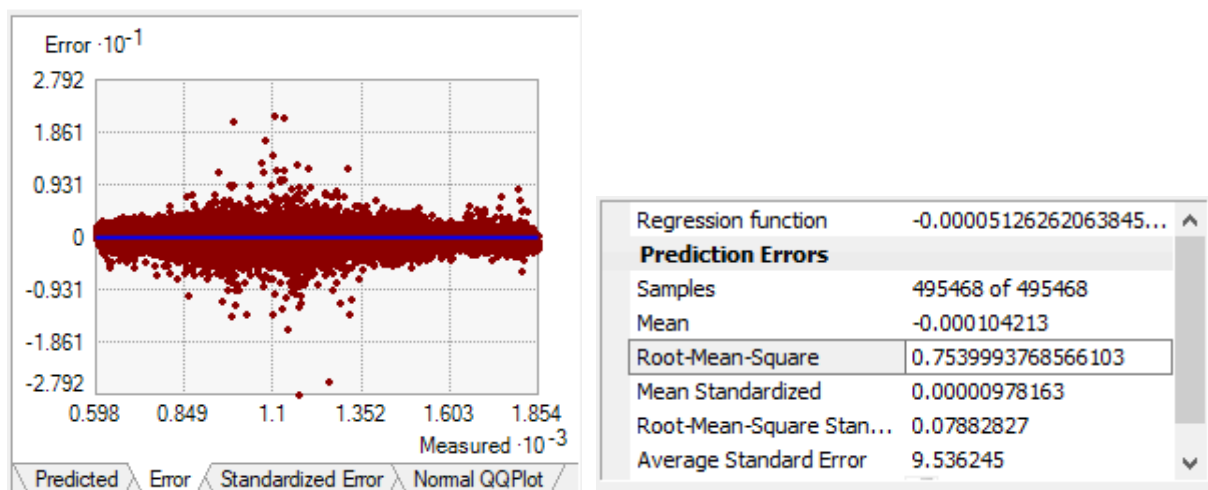


Figure V.9. Caractéristiques de l'erreur d'interpolation par krigeage Ordinaire

Les autres détails sur les données en entrée, la méthode d'interpolation utilisée, le type et les paramètres du modèle de semi variogramme utilisé sont récapitulés sur la figure V.10).

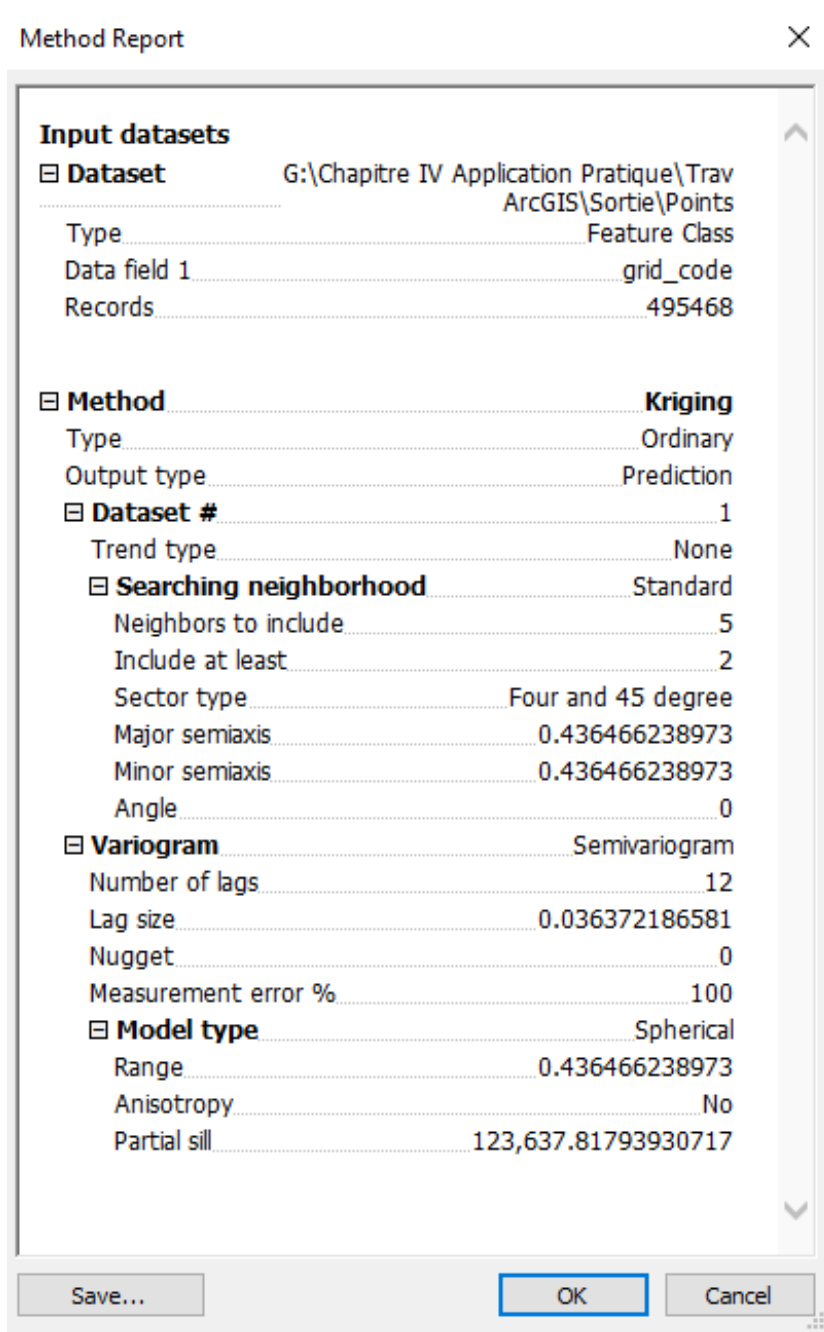


Figure V.10. Détails sur les données en entrée, la méthode d'interpolation, le type et les paramètres du modèle de semi variogramme

La carte de prédiction des altitudes en mode dégradé obtenue par la méthode d'interpolation de type géostatistique, par krigeage ordinaire est schématisée sur la figure V.11.

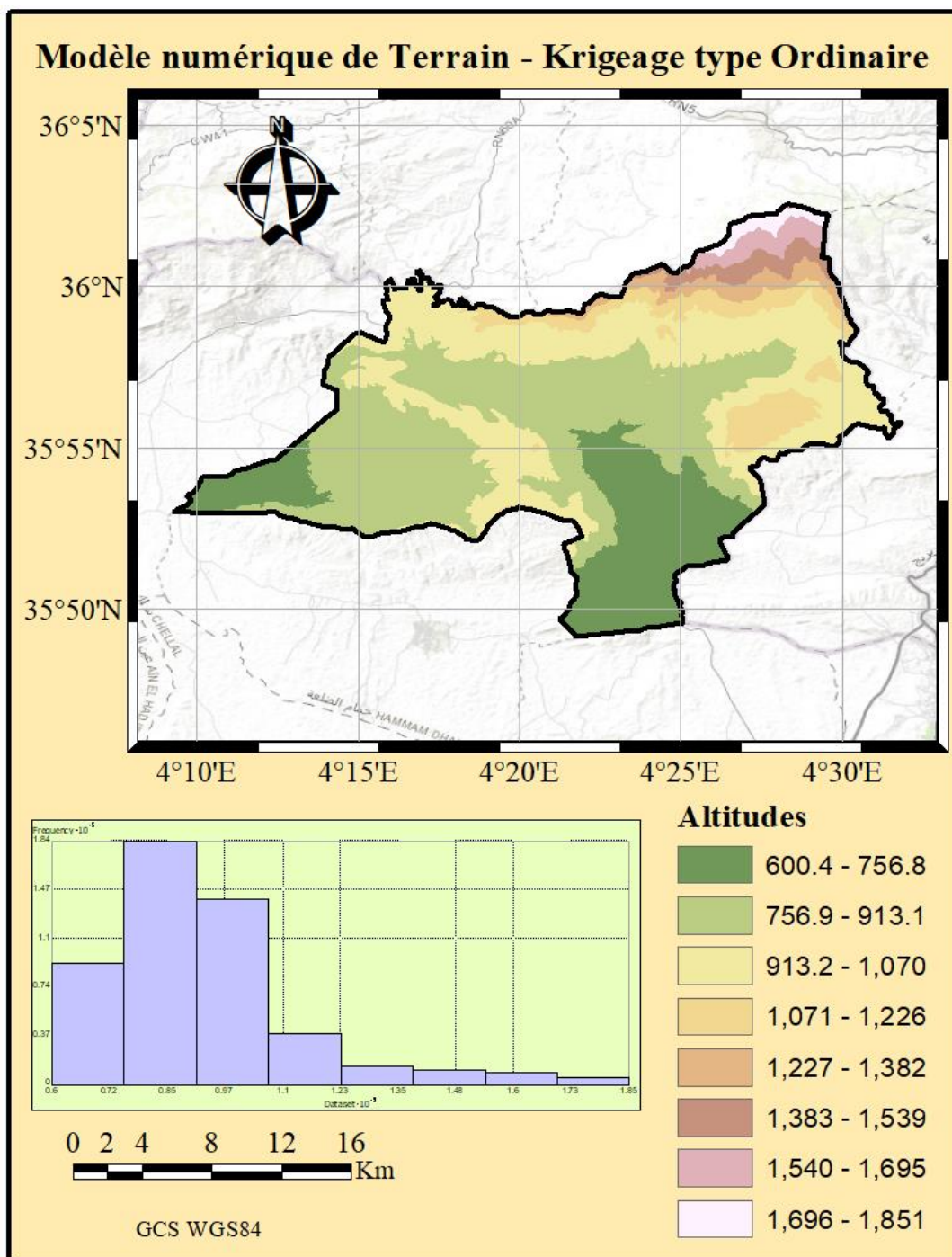


Figure V.11. Carte MNT en dégradé par la méthode de Krigeage ordinaire

Les hautes altitudes sont concentrées dans la région Nord et Est c'est la zone des montagnes d'AbdAbdellah à Dreat séparant Msila et Mansoura à BBA, tandis que les basses altitudes sont concentrées au centre et au Sud-Ouest c'est la région plate Dhokara et Elhodna proche du triangle Hammam Dalaa, Ouled Mansour et Tarmount.

La carte de variance d'erreur de prédiction des altitudes est schématisée sur la figure V.12.

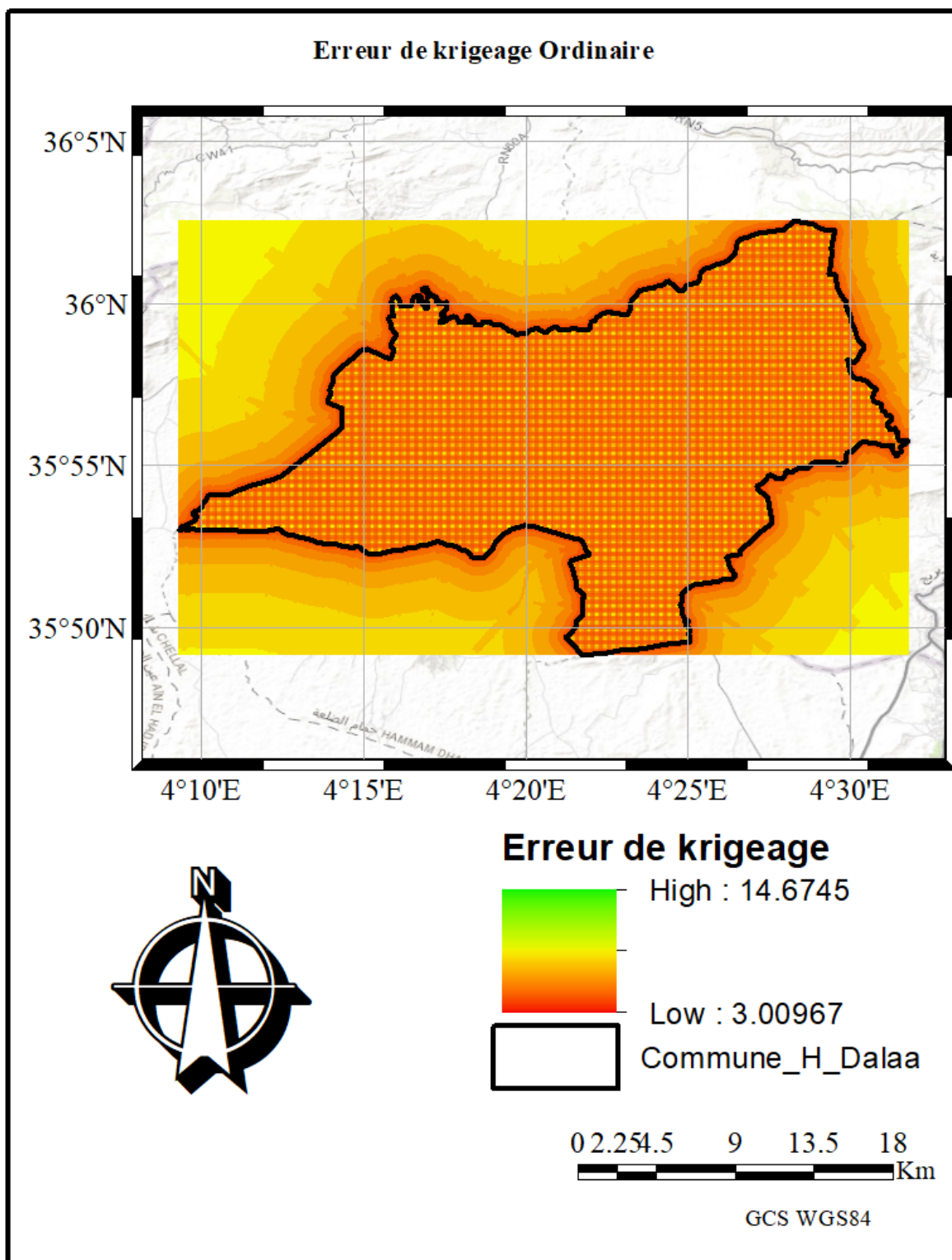


Figure V.12. Carte de variance d'erreur de prédiction obtenue par krigeage Ordinaire

La variance d'erreur de krigeage pour la zone étudiée est très faible car elle est de l'ordre de 3m.

V.4.2.3. Méthode de Krigeage Universel

La carte de prédiction des altitudes en mode dégradé obtenue par la méthode d'interpolation de type géostatistique, par krigeage universel est schématisée sur la figure V.13.

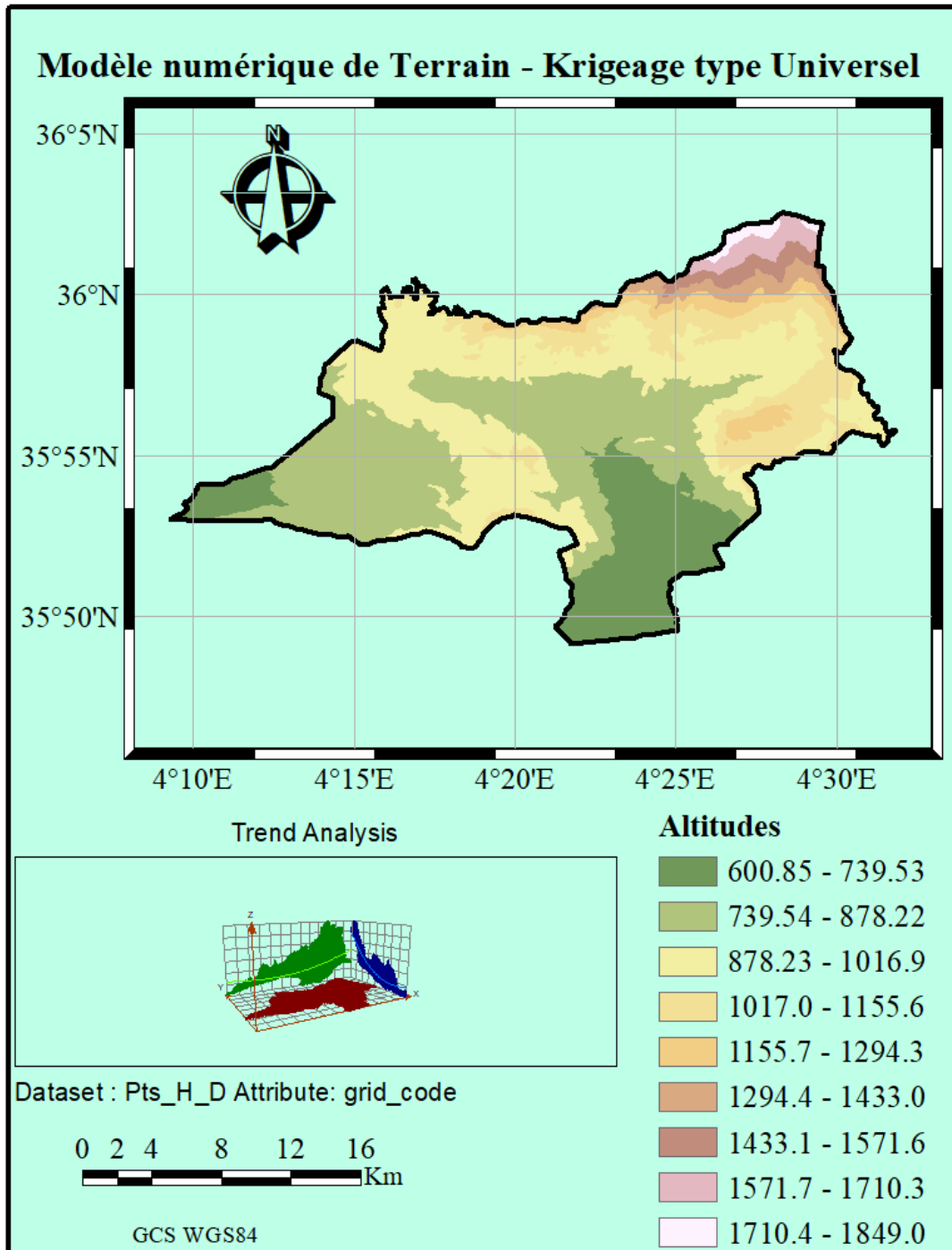


Figure V.13. Carte MNT en dégradé par la méthode de Krigeage Universel

La carte de prédiction des altitudes en mode deux bandes en niveau de gris dite « stretched » qu'on utilise pour créer les cartes qui nous permettent d'analyser la susceptibilité aux glissements, aux inondations tels que les cartes thématiques des pentes, d'aspect, d'exposition et les différentes cartes d'hydrologie est schématisée sur la figure V.14.

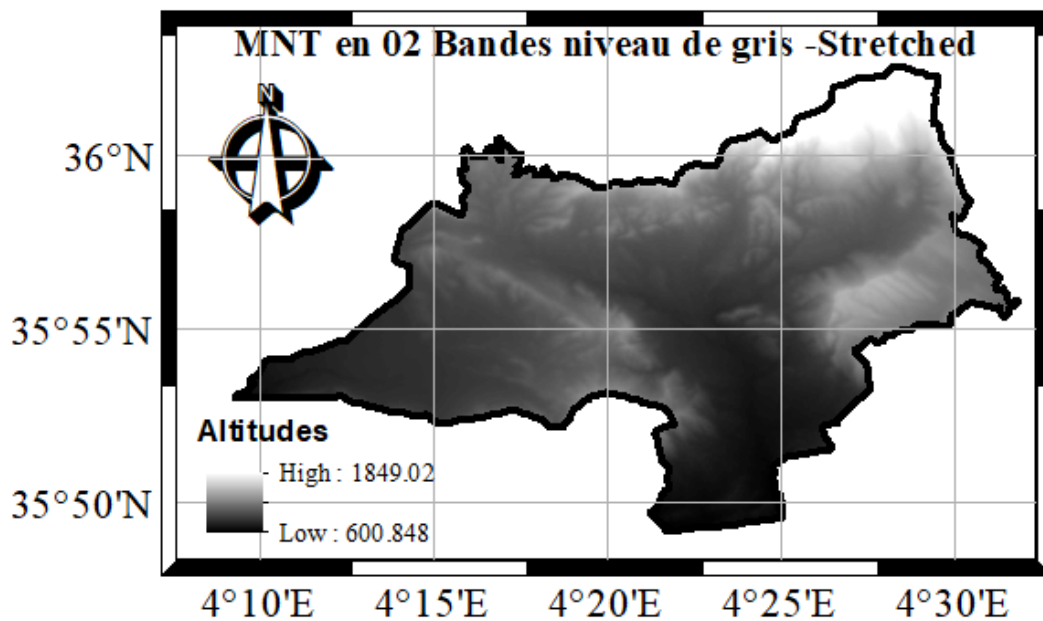


Figure V.14. Carte MNT en deux bandes niveau de gris par la méthode de Krigeage Universel

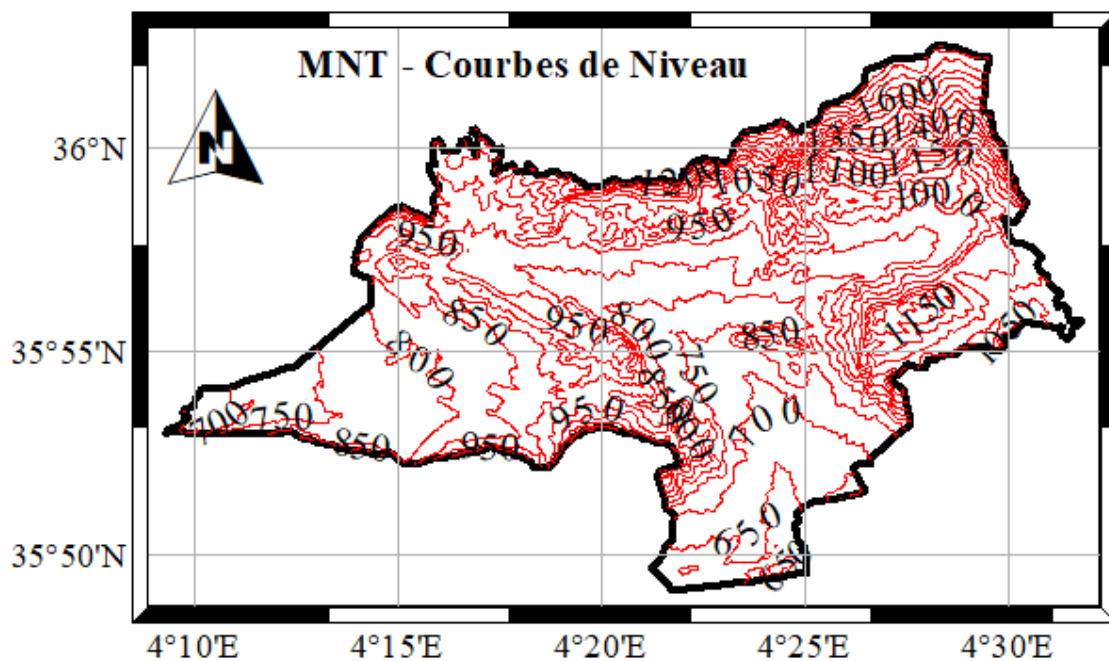


Figure V.15. Carte des courbes de niveau obtenue par la méthode d'interpolation Géostatistique

V.5. Validation et discussions des résultats des méthodes d'Interpolation par krigeage

Pour valider notre modélisation de prédiction par krigeage, un profil en long comportant 160 points a été levé à l'aide du carnet de terrain type Ranger d'un Récepteur GNSS SP80 (figure V.16).



Figure V.16. Carnet de terrain type Ranger

Le levé GPS a été bien choisi sur terrain, allant de du sud-ouest c'est-à-dire la région de Dhokara, traversant le centre de la ville de Hammam Dalaa et passant par la forêt d'el Haourane, jusqu'au monts de Dreat au Nord.

La superposition du levé de ce levé sur la carte de prédiction du MNT, nous permet de confirmer que les hautes altitudes sont concentrées dans la région Nord et Est c'est la zone des montagnes d'AbelAbdellah à Dreat à la frontière de la commune de Mansoura à Bordj Bou Arréridj, tandis que les basses altitudes sont concentrées au centre et au Sud-Ouest c'est la région plate Dhokara et El-Hodna proche du triangle Hammam Dalaa, Ouled Mansour et Tarmount (figure V.17).

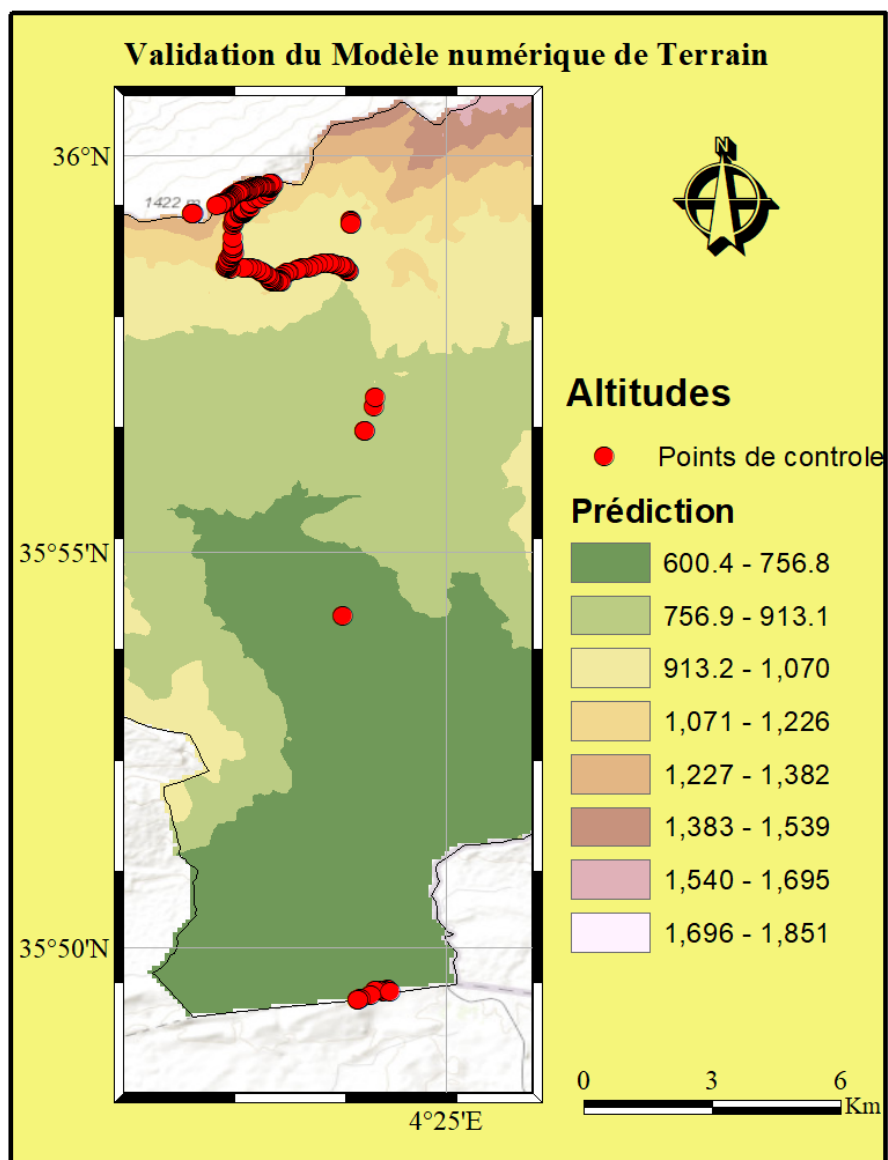


Figure V.17. Validation sur la base d'un levé GPS manuel

Notre maillage de points d'entrée s'est limité à la frontière de la commune ce qui a faussé les résultats dans les régions limitrophes aux communes adjacentes.

Ces résultats sont confirmés sur les représentations en 3D (figure V.18).et en comparaison avec les images Google Earth en trois dimensions (figure V.19).

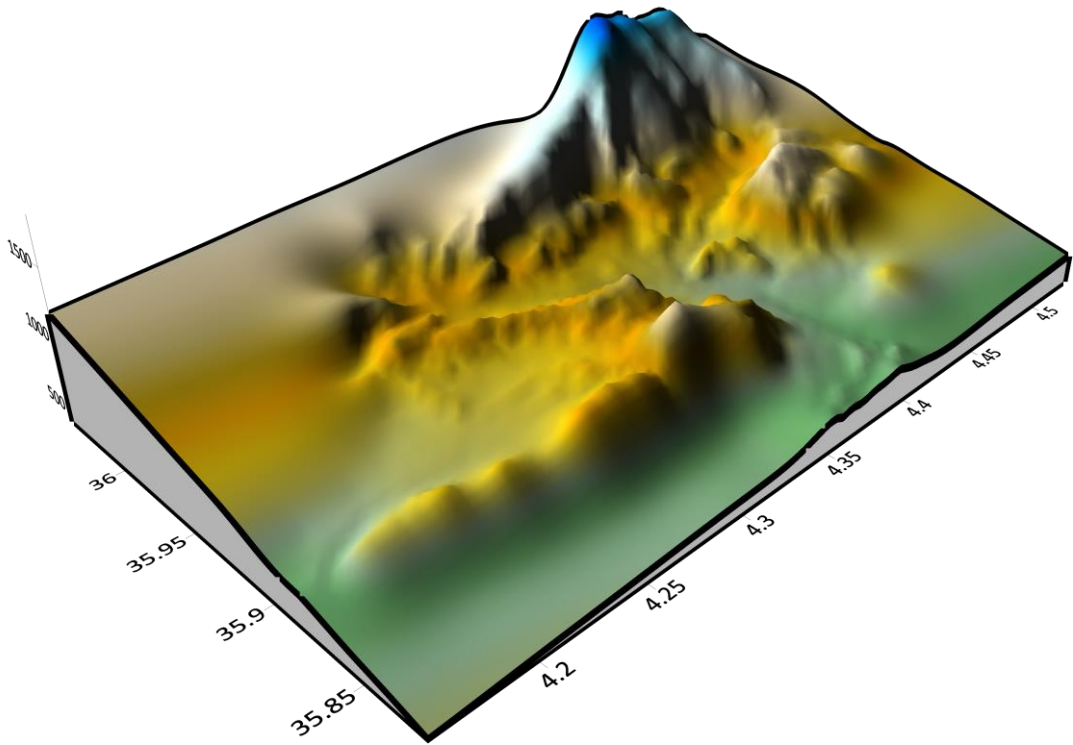


Figure V.18. Surface 3D obtenue par interpolation par krigeage à l'aide du logiciel Surfer

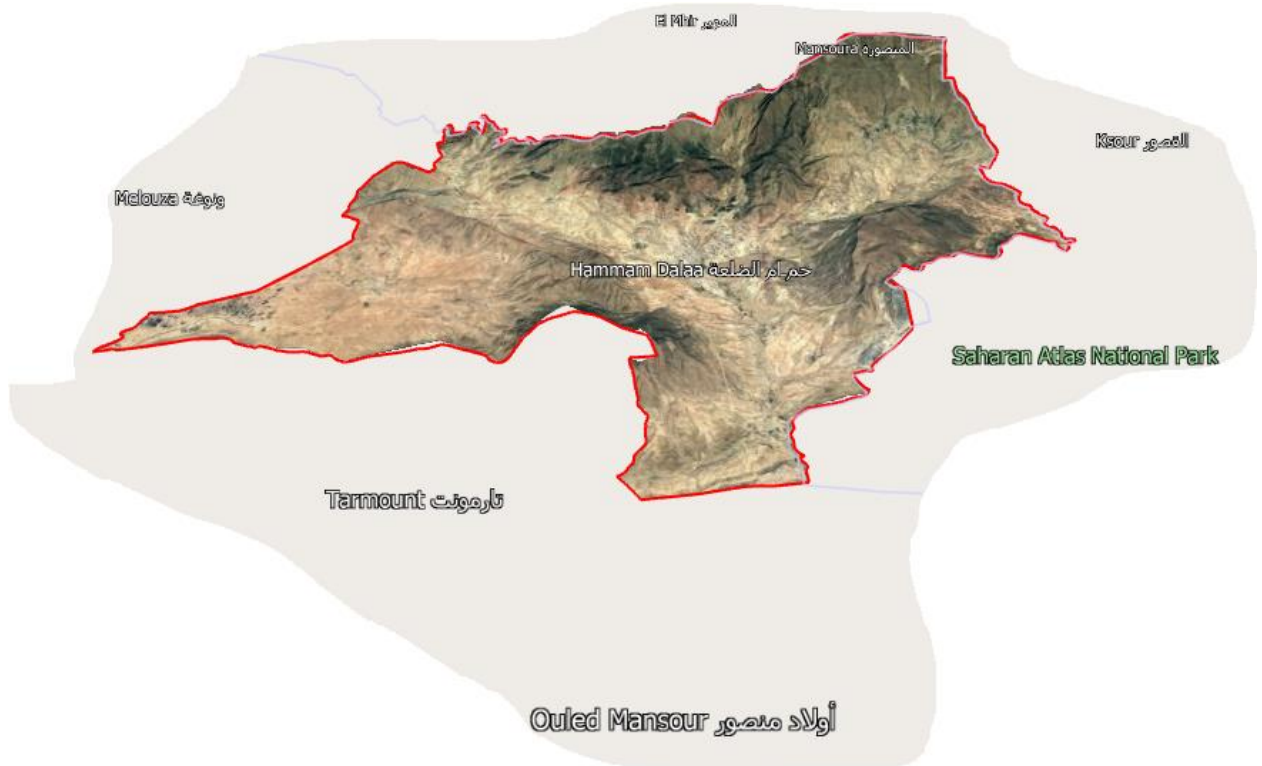


Figure V.19. Image Google comparable à la surface 3D obtenue par interpolation

V.6. Synthèse

Pour les ensembles de données plus volumineux, le Krigeage est plutôt lent, mais nous pouvons dire que les techniques de krigeage s'adaptent plutôt bien, quelles qu'elles soient les variations de terrain.

Dans les zones à faible pente, le Krigeage donne de très bons résultats, et nous conseillons de l'adopté dans ce cas.

Dans les zones de forte pente, les différences moyennes sont moins marquées et ont doit les analyser plus au cas par cas.

Le Krigeage est la méthode de maillage qui génère une bonne carte pour la plupart des ensembles de données, et il est la seule méthode qui peut extrapoler les valeurs de la grille au-delà de la plage Z de vos données.

Conclusions Générales

Pour générer un MNT on part de données vectorielles (points, lignes, surfaces) contenant des informations de hauteur (élévation), que l'on interpole pour avoir une surface continue XYZ.

La précision du modèle de terrain généré dépend du mécanisme d'interpolation utilisé.

Les méthodes d'interpolation sont basées sur le principe de l'autocorrélation spatiale, qui suppose que, plus les points sont proches, plus ils se ressemblent.

Des méthodes d'interpolation différentes appliquées sur les mêmes données peuvent produire des résultats différents. Il est donc nécessaire d'évaluer la pertinence comparée de ces méthodes.

Il est donc nécessaire d'étudier la performance comparée des différentes méthodes dans ce contexte. Nous avons comparé les techniques d'interpolation géostatistiques, à savoir : le krigeage simple, ordinaire, et universel. C'est une méthode d'interpolation géostatistique qui utilise un variogramme (analyse de la variabilité des données en fonction de la distance qui les sépare). Le variogramme dépend de la répartition spatiale des données plutôt que sur les valeurs réelles. Quand on applique la méthode de krigeage on peut voir des résultats pour des points en entrée différents de la valeur en entrée.

D'une manière générale, malgré que leurs exécutions sont lentes, nous pouvons dire que les techniques de krigeage s'adaptent plutôt bien, quelles qu'elles soient les variations de terrain.

Dans les zones à faible pente, le Krigeage donne de très bons résultats, et nous conseillons de l'adopté dans ce cas. Dans les zones de forte pente, les différences moyennes sont moins marquées et ont doit les analyser plus au cas par cas.

Dans tous les cas, le krigeage donne de bons résultats, même pour les zones de forte déclivité ainsi que pour les zones couvrant des pentes abruptes et douces à la fois. La méthode prend en compte la structure d'autocorrélation des altitudes de région pour définir les poids optimaux. Cependant, en revanche, cette méthode nécessite des utilisateurs qualifiés ayant de bonnes connaissances en géostatistique.

La superposition de mesures GPS manuelles sur un profil longitudinal au sol soigneusement sélectionné nous permet de conclure que le krigeage donne de très bons résultats dans les zones à faible pente et nous le recommandons dans ce cas. Sur les pentes raides, la différence moyenne est moins prononcée et une analyse plus approfondie doit être effectuée au cas par cas.

Cela est dû aux limites de la grille des points d'entrée à la frontière de la commune, ce qui modifie les résultats pour les zones limitrophes des communes adjacentes.

Cela est dû à la limitation du maillage de points d'entrée à la frontière de la commune ce qui a altéré les résultats dans les régions limitrophes aux communes adjacentes.

Les résultats sont confirmés sur les représentations 3D en comparaison avec les images Google.

Références Bibliographique

Arnaud (M.), Emery (X.), 2000. Estimation et interpolation spatiale, Méthodes déterministes et méthodes géostatistiques. Hermès Science Europe, 2000, 221p.

Baddeley, E. Rubak, R. Turner Spatial Point Patterns (2015) Brunson, C., Fotheringham, A. S., Charlton, M. E. Geographically weighted regression: a method for exploring spatial nonstationarity (1996).

Interpolation spatiale. Méthodes d'interpolation <http://www.ggr.ulaval.ca/Cours/ggr-13470/htm/Semaine10.htm>

Kechroud A., Boufessiou M. (2021), la prédiction spatiale par krigeage des propriétés des sols, validation sur un cas réel (Carte de salinité à Matmar –wilaya de Relizane). Mémoire de Master en géotechnique à l'université de M'sila.

Matheron G. La théorie des variables régionalisées et ses applications. Les cahiers du centre de morphologie mathématique de Fontainebleau, Ecole Nationale Supérieure des Mines, Paris, Fascicule 5, 1970, p. 212.

Mohamed Chicouche Nouha (2020), Evaluation géostatistique de la stabilité d'un versant naturel pré-fissuré. Mémoire de Master en géotechnique à l'université de M'sila.

N.L. Cressie Statistics for spatial data (1993) M. Hannoun Un survol des méthodes élémentaires en statistique spatiale (2000) M. Fischer, A. Getis Handbook of applied.

Neguez Nedjem Eddine, Douadi Zakaria (2019), Evaluation géostatistique de la stabilité d'un remblai (application au cas du remblai de l'extension de l'aérodrome d'Ain Arnat – wilaya de Sétif). Mémoire de Master en géotechnique à l'université de M'sila.

Phillips D.L. - Dolph J. - Marks D. "A comparaison of geostatistical procedures for spatial analysis of precipitation in mountainous terrain", Agriculture and Forest Meteorology, vol. 58, 1992, 119-141.

Rhind D. "A skeletal overview of spatial interpolation techniques", Computer Applications, vol. 2, n° 3/4, 1975, 293-309.

Sandra Aussel, Laure Saligny (2005), Géomatique, Analyse & Modélisation Spatiale en Archéologie. Support de cours - Conception d'un MNT à partir de relevés GPS.

Sibson R. "A Brief Description of Natural Neighbor Interpolation, Interpreting Multivariate Data", John Wiley and Sons, Barnett editor, New York, 1981, 21-36.

Zourig M., Korichi I. (2021), Effet de la méthode d'interpolation sur l'établissement d'une carte de prédiction, application à l'établissement du MNT de la zone de Bichara à Maadid -wilaya de Msila. Mémoire de Master en géotechnique à l'université de M'sila.

Sites internet

Traitement et visualisation des données tridimensionnelles

<http://www.unites.uqam.ca/dgeo/GEO7511/htm/section11.htm>

Interpolation spatiale. Méthodes d'interpolation

<http://www.ggr.ulaval.ca/Cours/ggr-13470/htm/Semaine10.htm>

Le krigeage : la méthode optimale d'interpolation spatiale (Yves Gratton)

http://www.iag.asso.fr/pdf/krigeage_juillet2002.pdf

Statistiques et Interpolations dans les SIG (Laurent Drapeau)

<http://www.faocopemed.org/vldocs/0000028/publi10.pdf>

Technologie MNT (Computa maps)

http://www.computamaps.com/fr_tech_dtm.php

Guide d'utilisateur du récepteur GNSS SP80

<http://www.spectraprecision.com/eng/sp80.html#.Vd72zJdWIQp>

Manuels ESRI

- Using ArcGis 3D Analyst
- Using ArcGis Geostatistical Analyst

Manuel ArcGIS desktop10.8 d'ESRI, <https://desktop.arcgis.com/fr/arcmap/10.7/tools/3d-analyst-toolbox/how-kriging-works.htm>

Annexe



Présentation du Récepteur GNSS SP80



GNSS et GPS

GNSS Global Navigation Satellite System

GNSS signifie **Global Navigation Satellite Système**, et est un terme générique qui englobe tous les systèmes mondiaux de positionnement par satellite. Cela comprend plusieurs constellations de satellites en orbite au-dessus de la surface de la Terre et émettant en continu des signaux fournissant un positionnement géospatial autonome avec une couverture mondiale. Les **GPS** constellation (développée et contrôlée par le **États-Unis**) est toujours le plus utilisé **GNSS** dans le monde, mais les principaux pays ont maintenant développé leur propre constellation : **GLONASS (Russie)**, **Beidou (Chine)**, Et **Galileo (Europe)** avec une précision améliorée

Le GNSS est utilisé en collaboration avec des systèmes GPS où tous les récepteurs GNSS sont compatibles avec le GPS, mais les récepteurs GPS ne sont pas nécessairement compatibles avec le GNSS.

Un récepteur GPS a été conçu pour recevoir la constellation GPS uniquement (24 satellites) lorsque des équipements compatibles GNSS peuvent utiliser des satellites de navigation d'autres réseaux (chaque réseau contrôle entre 24 et 30 satellites).

Le récepteur GNSS SP80 de Spectra Precision

Le récepteur GNSS SP80 de Spectra Precision est le fruit d'une longue expérience en matière de technologie RTK GNSS. Il utilise un nouvel algorithme très sophistiqué pour le traitement des signaux GNSS (figure 1).



Figure 1. Récepteur simple GNSS SP80

Par ailleurs, le SP80 est le plus “connecté” des récepteurs GNSS du marché. Il est le premier à offrir une combinaison unique de communications intégrés comprenant modem cellulaire 3.5G, Wifi et UHF, avec une fonction antivol basé sur l'utilisation de SMS et d'e-mails.

Description du récepteur



Figure 2. Respectivement face avant, vue de dessous et vue de côté d'un récepteur GNSS

Carnet de terrain Ranger

Doté d'un large écran tactile lumineux et d'un clavier alphanumérique facile à utiliser, le carnet de terrain Spectra Géospatial Ranger répond parfaitement aux besoins opérationnels des géomètres. Il permet le transfert rapide et en simple des données par carte SDHC, clé USB, câble USB, Bluetooth, Wi-Fi ou réseau WWAN.

- La radio intégrée de 2,4 GHz en option permet de communiquer avec votre station totale robotisée.
- Modem WWAN en option pour le réseau RTK et la connectivité des données.
- Clavier alphanumérique complet avec touches directionnelles, touches Entrée multiples pour faciliter l'utilisation et la saisie rapide des données même avec des gants !
- Fourni avec le logiciel de terrain Survey Pro ou Layout Pro pour les professionnels de la topographie et de la construction.



Figure 3. Carnet de terrain type Ranger

Solution logicielle

Collecte aisée de données terrain

MobileMapper de Spectra Geospatial est une suite logicielle SIG offrant de nombreuses fonctions aux professionnels utilisant les systèmes d'information géographique tel que :

- Agriculteurs ;
- Sylviculteurs ;
- Employés des services publics ou personnel de sécurité pour gérer efficacement leurs actifs géoréférencés sur le terrain, mais aussi au bureau.

Elle se compose de :

- l'application de terrain **MobileMapper Field**, pour recueillir les données ;
- et du logiciel de bureau gratuit **MobileMapper Office**, pour configurer les projets et post-traiter les données.

Fonctionnant sur Android, la dernière version de MobileMapper Field conjugue facilité d'utilisation et simplicité avec des processus clairs et intuitifs. Avec cette application, Nous

pouvons définir des catégories d'entités (couches) et assigner autant de types d'attribut que nécessaire pour caractériser vos actifs.

Compatible avec les appareils Bluetooth, y compris les détecteurs de câbles et télémètres laser, MobileMapper Field permet de recueillir des données ou d'inspecter des points, lignes ou polygones.

Nous pouvons afficher les fonds de carte sur le logiciel pour visualiser facilement les entités et gérer les ensembles de données SIG complexes sur le terrain.

Il est aussi possible de collecter des données GNSS brutes en arrière-plan pour le posttraitement avec MobileMapper Office, améliorant considérablement la précision des positions enregistrées en temps réel.

Donc, même dans des conditions difficiles, la solution logicielle de Spectra Geospatial associe la meilleure position possible à vos données SIG.

MobileMapper Field

Trois types de couche ou de géométrie :

- Points
- Ligne
- Polygone

Affichage des fonds de carte.

Formats pris en charge :

- Cartes Google (par défaut)
- Cartes Raster (BMP, GIF, TIFF, JPEG)
- Données de cartes vectorielles (shp)

Systèmes de coordonnées

- Une bibliothèque de systèmes de coordonnées est disponible pour localiser les données SIG.

Fonction Goto

- À partir de la liste des points enregistrés
- Par saisie des coordonnées
- Sélection manuelle sur l'écran Carte

Post-traitement

- Collectez des données brutes en arrière-plan pour améliorer la précision des positions recueillies une fois au bureau. Cette fonction nécessite l'activation payante de l'option Post-traitement sur MobileMapper Field et l'utilisation exclusive (gratuite) de MobileMapper Office.

Format d'importation :

- Fichiers Shape (.shp)
- Fichiers MapInfo (.mif)
- Fichiers textes délimités par des virgules (.csv) uniquement pour les entités de point.

Format d'exportation :

- Fichiers Shape (.shp)
- Fichiers MapInfo (.mif)
- Fichiers textes délimités par des virgules (.csv) uniquement pour les entités de point.

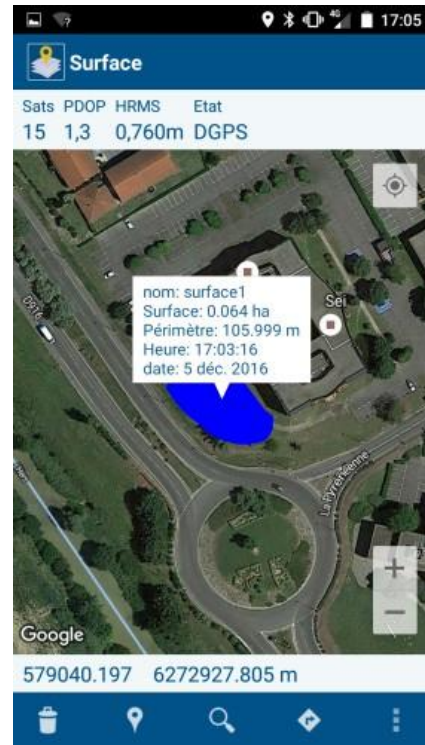


Figure 4. MobileMapper Software

MobileMapper Office

- Visualisez les données recueillies sur le terrain en tant que projets Cartes, plus pratiques que sur le terrain.
- Préparez le modèle de projet à utiliser dans MobileMapper Field
- Lancez une recherche automatique pour trouver les données brutes de référence qui correspondent à vos données brutes de terrain et téléchargez-les sur votre ordinateur.

Les Réseaux pris en charge :

- IGS (réseau mondial) ;
- NGS (États-Unis) ;
- RGP (France).

- Post-traitez les données de référence et les données brutes de terrain pour déterminer des positions plus précises pour toutes vos entités.
- Effectuez des tests de qualité au stade du post-traitement
- Affichez des fonds de carte (Raster uniquement)
- Créez de nouvelles catégories de couches pour vos futurs projets
- Visualisez vos entités sur Google Earth
- Exportez des données dans des formats standard (csv, kml, gpx, shp)
- Convertissez vos projets existants pour obtenir les résultats dans différents systèmes de coordonnées
- Utilisez une option pour obtenir une précision centimétrique dans les résultats de post-traitement
- Vous pouvez télécharger (gratuitement) MobileMapper Office sur SpectraGeospatial.com.

Travail de terrain

Pour valider notre modélisation de prédiction par krigeage, un profil en long comportant 160 points a été levé à l'aide du **carnet de terrain** d'un Récepteur GNSS SP80

Le levé GPS a été bien choisi sur terrain, allant de du sud-ouest c'est-à-dire la région de Dhokara, traversant le centre de la ville de Hammam Dalaa et passant par la forêt d'el Haourane, jusqu'au monts de Dreat au Nord.





Figure 5. Levé au moyen du carnet de terrain type Ranger

Le fichier recueilli est de type textes délimités (.csv).

```
1 626869.303 3965113.835 626.104
2 626819.691 3965087.051 618.763
3 626784.075 3965071.378 623.463
4 626705.717 3965095.958 637.322
5 626628.921 3965095.598 646.941
6 626543.379 3964969.746 638.400
7 626358.243 3964889.439 685.319
8 626309.519 3964863.595 705.958
9 626310.274 3964863.421 705.958
10 626918.758 3965067.577 627.825
11 625904.250 3973810.368 689.789
12 626414.115 3978716.332 869.651
13 626438.116 3978919.156 911.951
```

Le post traitement des données a été fait à l'aide du logiciel ArcMap d'ArcGIS.